



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Ronchi test

Bakalářská práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1802Ro22 – Informatika a logistika

Autor práce: **Robin Dvořák**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Psota

Konzultant práce: Ing. Petr Vojtíšek





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Ronchi test

Bachelor thesis

Study programme: N2612 – Electrotechnology and informatics

Study branch: 1802Ro22 – Informatics and logistics

Author: **Robin Dvořák**

Supervisor: Ing. Pavel Psota

Consultant: Ing. Petr Vojtíšek



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Robin Dvořák**
Osobní číslo: **M11000013**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Informatika a logistika**
Název tématu: **Ronchi test**
Zadávací katedra: **Ústav nových technologií a aplikované informatiky**


Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte odbornou literaturu a vypracujte literární rešerši sáhledem na základní principy optického měření s důrazem na tzv. Ronchi test.
2. Na základě provedené rešerše navrhnete optickou část měřicího systému.
3. Navržené uspořádání sestavte a proveďte typová měření.
4. Zpracujte a zhodnoťte dosažené výsledky.


Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 45 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] SALEH, B. E. A; TEICH, M. C. Základy fotoniky. Praha: MATFYZPRESS, 1994.
[2] MALACARA, D. Optical shop testing, Wiley-Interscience, 2007.
[3] Odborné články podle doporučení vedoucího úkolu, příp. konzultantů, zejména záperiodik: Nature, Science, Physical Review Letters, Physical Review, Optics Express, JOSA A,B, Journal of Optics, Applied Optics, Optik, Optics Communication, IEEE série, SPIE Proceedings atd.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Psota
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Vojtíšek
Institute of Plasma Physics AS ČR, v.v.i.
Datum zadání bakalářské práce: 21. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 16. května 2014


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




prof. Dr. Ing. Jiří Maryška, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 21. října 2013

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 16.5. 2014

Podpis: *Radim Dvořák*

Abstrakt

V procesu výroby a produkce optických komponent je jednou z nejvýznamnějších oblastí testování a vyhodnocování kvality vyrobených produktů, jelikož umožňuje vytvořit účinnou zpětnou vazbu do výroby. Pro tento účel slouží mnoho rozličných přístupů ať optických, tak mechanických. Častou podmínkou pro zvolení vhodné vyhodnocovací metody je zajištění rychlého a nedestruktivního testování vyráběných optických povrchů.

Zde předkládaná bakalářská práce je zaměřena na jeden typ těchto nedestruktivních optických metod a to jmenovitě na Ronchi test. V práci je diskutován základní princip této testovací metody spolu s jeho vztahem vůči nožové metodě Foucaultova typu. Mimo principiální popis se práce též zabývá konstrukční problematikou a to jak v laboratorním uspořádání tak i pro nasazení ve výrobním procesu. Základní funkčnost je otestována na optických prvcích a výsledky porovnány s teoretickou předpovědí.

Abstract

In the process of manufacturing and producing of optical components, testing and quality evaluation of the manufactured products is one of the most important areas, as it allows to create effective feedback to production. There are many alternative ways for this purpose, whether optical or mechanical. Two of the most important requirements for choosing right method are - time undemanding measurements and non-destructive testing.

Main focus of this submitted bachelor thesis is on specific type of these non-destructive optical methods, namely on Ronchi test. Basic principle of this method is discussed and it is related to Foucault knife test. Besides principal description, this thesis is focused on construction problematics, both under the laboratory conditions and for production site, as well. Basic functionality is tested on optical elements and obtained results are compared with theoretical predictions.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Psotovi za vedení zde předložené bakalářské práce a možnost realizovat tento projekt. Velký dík patří Ing. Petru Vojtíškovi za věnovaný čas během konzultací, nespočet rad a připomínek, které zvýšily úroveň této práce, za jeho odborné vedení při konstruování Ronchi testu a především za jeho trpělivost. Dále též děkuji Ing. Janu Beránkovi za vyhotovení a zapůjčení Ronchi mřížek.

Obsah

Úvod	11
1 Úvod do interference	13
1.1 Základní pojmy elektromagnetického pole	14
1.2 Základní interferometry	18
1.3 Shrnutí	24
2 Teorie o testování	25
2.1 Foucaultův nožový test	25
2.2 Ronchi test	29
2.2.1 Princip Ronchi testu	30
2.2.2 Geometrická teorie	32
2.2.3 Fyzikální model	37
2.3 Shrnutí	38
3 Konstrukce Ronchi testu	39
3.1 Schéma a součástky	39
3.2 První prototyp	42
3.3 Druhý prototyp	46
3.4 Návrh konstrukce pro použití ve výrobě	54
3.5 Shrnutí	55
Závěr	58
Literatura	60

Seznam užitych zkratk a symbolů

a	Amplituda [$V \cdot m^{-1}$]
c	Rychlost světla [$m \cdot s^{-2}$]
d	Délka optické dráhy/mezera mezi proužky [m]
k	Vlnové číslo [m^{-1}]
n	Index lomu
p	Optická dráha [m]
t	Čas [s]
v	Frekvence [Hz]
A	Komplexní amplituda [$V \cdot m^{-1}$]
\bar{A}	Komplexně sdružená amplituda [$V \cdot m^{-1}$]
AM	Amplitudová modulace
B	Magnetická indukce [T]
CCD	Zařízení s vázanými náboji (Charge-coupled device)
CNC	Číslicové řízení počítačem (Computer numeric control)
E	Intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
€	Měna Euro
FM	Frekvenční modulace
$FWHM$	Šířka v polovině výšky (Full width half maximum)
I	Intenzita vlny [$W \cdot m^{-2}$]
IR	Infračervené záření
LED	Elektroluminiscenční dioda (Light emitting diode)
TA	Transverzální aberace
TV	Televizní vlny
UV	Ultrafialové záření
W	Vlnoplocha
$\Delta\phi$	Rozdíl fází
λ	Vlnová délka [nm]
φ	Fáze
φ	Natočení mřížky [deg]
τ	Časová prodleva [s]
ω	Úhlová frekvence [$rad \cdot s^{-1}$]

Úvod

Při výrobě optických komponent, je potřeba mezi jednotlivými výrobními procesy testovat kvalitu povrchu a tvar vyráběného elementu. Vzhledem k časové náročnosti některých procesů (např. leštění), je vhodné tyto činnosti provádět co nejefektivněji.

Jednou z možností, jak optické členy rychle a nedestruktivně testovat je použití tzv. Ronchi testu. Ve spolupráci s centrem TOPTEC ¹ vznikl návrh na realizaci Ronchi testu v jejich nové laboratoři v Turnově. Centrum disponuje Ronchi testem, který se ale nachází v předchozích prostorách centra. Pro možnost rychlého testování optických ploch v obou laboratořích padla volba na konstrukci nového Ronchi testu.

Vlastním zadáním práce je nastudování teoretické podstaty měření a na základě této rešerše navrhnout a sestavit optickou část měřicího systému.

Práce se skládá ze tří hlavních kapitol, jimž je předřazen úvod a jsou následovány závěrem. Ronchi test využívá k testování optických členů interferenčního jevu, první kapitola je tedy úvodem do interference. Interference je optickým jevem vzájemné interakce elektromagnetického vlnění, proto kapitola shrnuje základní pojmy elektromagnetického pole a plynule přechází k popisu elektromagnetických vln, jejichž součástí je i viditelné světlo. Druhá část první kapitoly z nadhledu popisuje principy základních interferometrů a interferometrických testů.

Druhou kapitolou je samotná rešerše principu Ronchiho testování. Jelikož

¹Ústav fyziky plazmatu, Akademie věd ČR, Centrum speciální optiky a optoelektroniky TOPTEC - toptec.eu

Ronchi test je modifikací Foucaultovo nožového testu, úvod kapitoly se věnuje vysvětlení jeho principu. Při popisu principu obou testů byla nejprve nastíněna jejich odezva při testování dokonale sférického povrchu a následoval popis chování při měření sférického povrchu s vadou.

Třetí část práce se zaměřuje na konstrukci testu od výběru součástek, až po provedení měření vybraného optického členu. Postupně vznikly dva prototypy, kde první sloužil především k ověření funkčnosti principu a analýze délek optických drah. Druhý prototyp pak vycházel z poznatků získaných při stavbě první testovací sestavy. Vlastní funkčnost realizovaného Ronchi testu je následně otestována na testovacím povrchu a výsledky jsou porovnány s teoretickou předpovědí získanou vhodným simulačním nástrojem.

Práce je shrnuta v závěru, který je následován přehledem užití literatury.

1 Úvod do interference

Interference, jakožto optický jev vzájemné interakce elektromagnetického záření, se vyskytuje v mnoha oblastech lidské činnosti, a to i v těch všedních, aniž by to bylo zřejmé [1, 2]. Jednoduchým příkladem je mýdlová bublina, nebo olejová skvrna, na které jsou pozorovatelné barevné efekty. To je způsobeno tím, že část světla se odrazí a část pronikne do optické vrstvy a odrazí se až na druhém rozhraní. Následná interakce těchto dvou vln dá vzniknout oněm barevným efektům. Tloušťka optické vrstvy musí být velmi malá (jednotky λ , aby rozdíl optické dráhy byl menší, než tzv. koherentní délka světla (viz. dále)). S rostoucí tloušťkou se rozdíl optické dráhy mezi interferujícími vlnami zvětšuje a pokud dojde k překročení koherentní délky, dochází k zániku interferenčního jevu¹.

Díky malé vlnové délce světla, vytváří i velmi malý rozdíl v optické dráze měřitelné změny v poloze interferenčního obrazce. Tohoto jevu se využívá v interferometrii pro velmi přesná měření.

Rozsah působnosti a přesnost optické interferometrie rozšířilo několik přelomových vynálezů. Nejdůležitějším vynálezem pro široké použití v měření se stal laser. Laser překonal limity konvenčních zdrojů světla, protože vyzařuje vysoce koherentní monochromatické světlo. Tímto se zasloužil o vznik mnoha nových interferometrických technik.

Některé dnešní aplikace optické interferometrie se používají pro velmi přes-

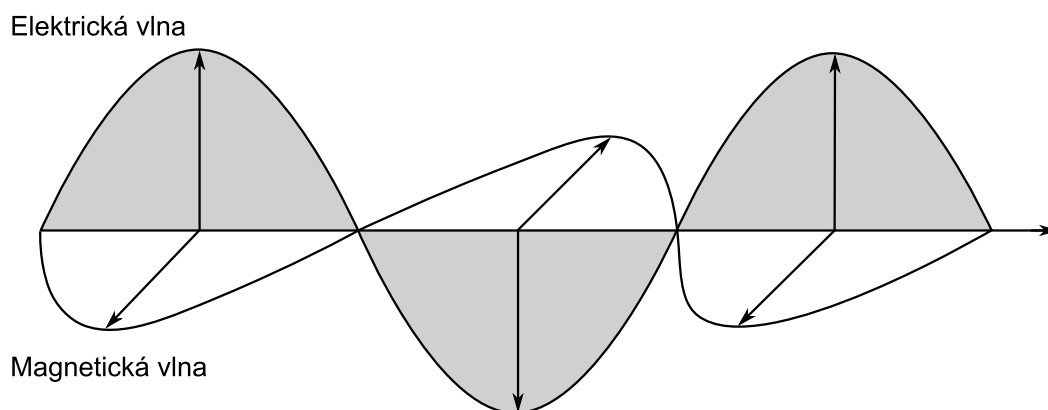
¹Nedochází k úplnému zániku, pokles existence (kontrastu) interferenčních proužků je zvolný, ale koherentní délka je definována jako pokles kontrastu pod určitou hodnotu \rightarrow např. 10% z původní hodnoty.

ná měření vzdálenosti, vibrací, teploty, tlaku, elektrických a magnetických polí. Dále se používají k bezdotykovému testování optických systémů, studování topografie povrchů apod.

V této kapitole jsou shrnuty základní pojmy potřebné k pochopení principu interference světla. První část kapitoly se věnuje elektromagnetickému poli, jelikož viditelné světlo je součástí elektromagnetického vlnění. Ve druhé části kapitoly jsou z nadhledu vysvětleny principy základních interferometrů a interferometrických testů.[1, 2, 3]

1.1 Základní pojmy elektromagnetického pole

Elektromagnetické vlnění představuje děj vzájemných přeměn elektrické a magnetické složky pole. Intenzita elektrického pole E a magnetická indukce B představují v elektromagnetické vlně dva vektory, které kmitají ve fázi a tvoří příčné vlnění² [1].

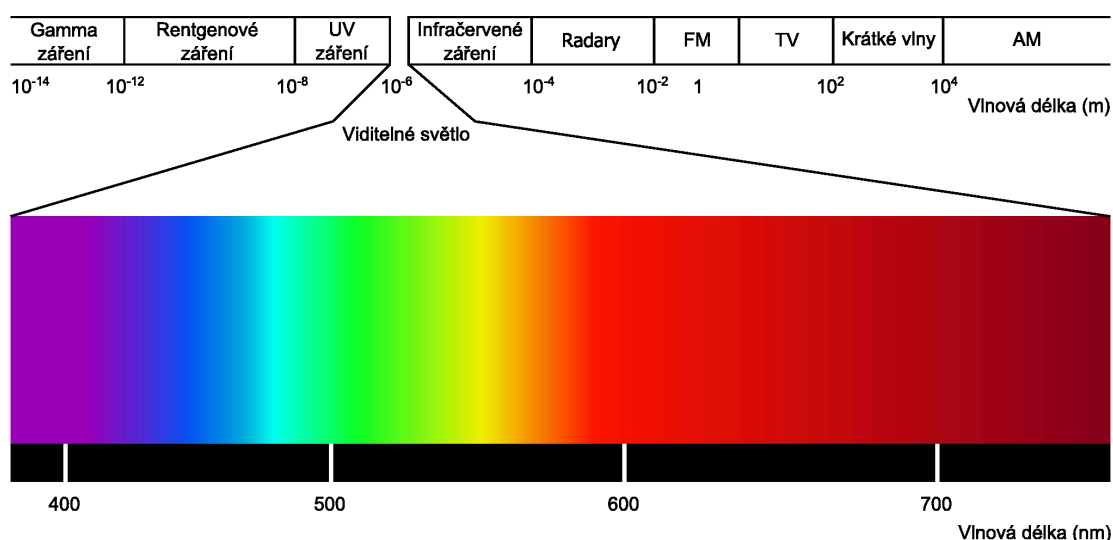


Obrázek 1.1: Světelná vlna

²Toto není úplně přesné (nemusejí např. kmitat ve fázi), ale pro naší potřebu bude tento základní pohled postačující.

Spektrum elektromagnetických vln

Jednotlivé typy elektromagnetických vln se dělí podle jejich vlnové délky λ (resp. frekvence - $\lambda = c/v$, kde c je rychlost světla a v je frekvence). Nejkratší vlnovou délku má gamma záření, které plynule přechází přes rentgenové záření až po ultrafialové (UV) záření. Na UV záření navazuje viditelné světlo (obrázek 1.2), které postupně přechází do infračerveného záření. Mezi jednotlivými typy záření neexistují ostré hranice, jeden typ záření volně přechází do druhého. Rádiové vlny mají délku řádově od centimetrů až po kilometry. V tomto rozsahu se nacházejí rozhlasové a televizní vlny.



Obrázek 1.2: Vlnové délky elektromagnetických vlnění a viditelného světla

Viditelné světlo

Viditelné světlo obsahuje vlny o vlnové délce od 390 nm (fialová barva) do 760 nm (červená barva), to přibližně odpovídá frekvenci $3,9 \cdot 10^{14}$ Hz, respektive $7,6 \cdot 10^{14}$ Hz [1]. Kratší vlny se nachází v ultrafialovém záření (UV) a delší v infračerveném záření (IR).

Světlo je složeno z příčných elektromagnetických vln šířících se prostorem. Z důvodu vzájemné vazby elektrického a magnetického pole (viz. [3]), stačí uvažovat pouze pole elektrické, které lze vyjádřit jako³

$$E = ae^{i(\omega t - kz)} = Ae^{i\omega t} \quad (1.1)$$

kde E je intenzita elektrického pole, $A = ae^{(-ikz)}$, a je amplituda, ω je úhlová frekvence, t je čas, z je vzdálenost podél osy z a $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ je vlnové číslo⁴ [1, 4].

Interference dvou vln

Překrytím (superpozicí) dvou monochromatických světelných vln s komplexními amplitudami A_1 a A_2 vznikne monochromatická vlna o stejné frekvenci [1, 4]

$$E = E_1 + E_2 = A_1e^{i\omega t} + A_2e^{i\omega t} = (A_1 + A_2)e^{i\omega t} = Ae^{i\omega t} \quad (1.2)$$

Intenzitu výsledné vlny získáme vztahem

$$I = |A|^2 = |A_1 + A_2|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + \bar{A}_1A_2 + A_1\bar{A}_2 \quad (1.3)$$

kde \bar{A}_1 a \bar{A}_2 jsou komplexně sdružená k A_1 a A_2 . Po substituci $A_1 = \sqrt{I_1}e^{i\varphi_1}$ a $A_2 = \sqrt{I_2}e^{i\varphi_2}$, kde φ_1 , a φ_2 jsou fáze původních dvou vln a definici rozdílu fází ve tvaru $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ můžeme intenzitu zapsat jako

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{(I_1I_2)}\cos(\Delta\varphi) \quad (1.4)$$

kde I_1, I_2 je intenzita jednotlivých vln a $2\sqrt{(I_1I_2)}\cos(\Delta\varphi)$ je tzv. interferenční člen [1, 4].

³Pro jednoduchost uvažujeme rovinnou vlnu se směrem šíření podél osy z .

⁴Obecně (při obecném směru šíření rovinné vlny) by zde bylo na místě psát vlnový vektor $k = (k_x, k_y, k_z)$, ale jelikož uvažujeme směr šíření jenom ve směru osy z (tj. $k_x = 0$ i $k_y = 0$) můžeme ztotožnit tento vektor se složkou k_z a jednoduše psát jen k .

V případě, že dvě vlny pochází ze společného zdroje a mají stejnou počáteční fázi ($\varphi_{10} = \varphi_{20}$), fázový rozdíl $\Delta\varphi$ odpovídá rozdílu optické dráhy⁵

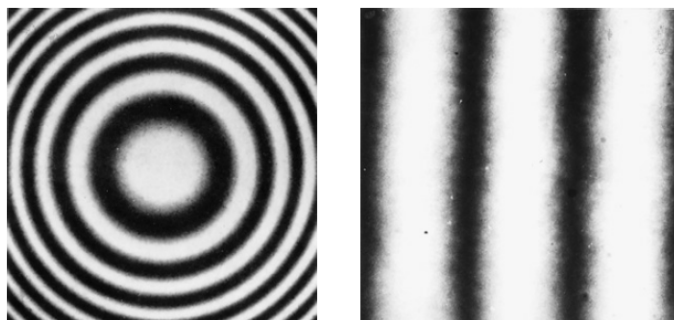
$$\Delta p = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi \quad (1.5)$$

nebo časové prodlevě τ

$$\tau = \frac{\Delta p}{c} = \frac{\lambda}{2\pi c} \Delta\varphi \quad (1.6)$$

kde c je rychlost světla [1, 4].

Pokud se rozdíl fáze mezi dvěma vlnami lineárně mění, prostorová změna intenzity I má harmonický charakter. Na základě tohoto jevu vznikají světlé a tmavé proužky (viz. obrázek 1.3), které jsou známé jako tzv. interferenční proužky. Tyto proužky (maxima a minima) odpovídají konstantnímu rozdílu optické dráhy, u světlého proužku je fázový rozdíl dvou vln nulový nebo násobek 2π , u tmavého proužku je to lichý násobek π (viz. vztah 1.4).



Obrázek 1.3: Newtonovy interferenční proužky [1].

Lokalizace interferenčních proužků

Při použití rtuťové výbojky s monochromatickým filtrem nebo jakéhokoli jiného zdroje světla, než bodového monochromatického zdroje (laseru), dochází

⁵ $\varphi_1 = kz + \varphi_{10} = \frac{2\pi}{\lambda} z_1 + \varphi_{10} \Rightarrow \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \underbrace{(z_2 - z_1)}_{\Delta p} + \underbrace{(\varphi_{20} - \varphi_{10})}_0 \Rightarrow \Delta p = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi$

k tomu, že interferenční proužky jsou viditelné pouze v určité části obrazce. Tento jev je způsoben nedostatkem koherence světla⁶.

Rozšířený zdroj si můžeme představit jako pole bodových zdrojů světla, kde každý produkuje svůj interferenční obrazec. Když se rozdíly v optických drahách v bodě pozorování liší od původních vln, nebudou se tyto základní interferenční obrazy shodovat a při jejich složení, bude mít výsledný obrazec zhoršenou kvalitu (nižší kontrast) [1].

1.2 Základní interferometry

K měření pomocí interference se využívá optická sestava, ve které je měřený objekt nasvícen z jednoho světelného zdroje. Vyzařovaný světelný svazek se rozdělí na dva a jeden z těchto svazků dorazí po optické dráze k měřenému objektu a druhý svazek je referenční. Oba svazky jsou poté porovnány. Rozdíl mezi interferujícími vlnoplochami (světelnými svazky) je dán vztahem [2]

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \sum (n_1 d_1) - \sum (n_2 d_2) \quad (1.7)$$

kde n je index lomu, d je délka optické dráhy a sumy vyjadřují součet příspěvků jednotlivých optických členů v dané optické dráze.

K obdržení ostrého kontrastního interferenčního obrazce musí mít obě světelné vlny stejnou frekvenci a konstantní fázový posun, který by se neměl v čase měnit. Toho je možné docílit použitím jednoho světelného zdroje pro obě optické dráhy.

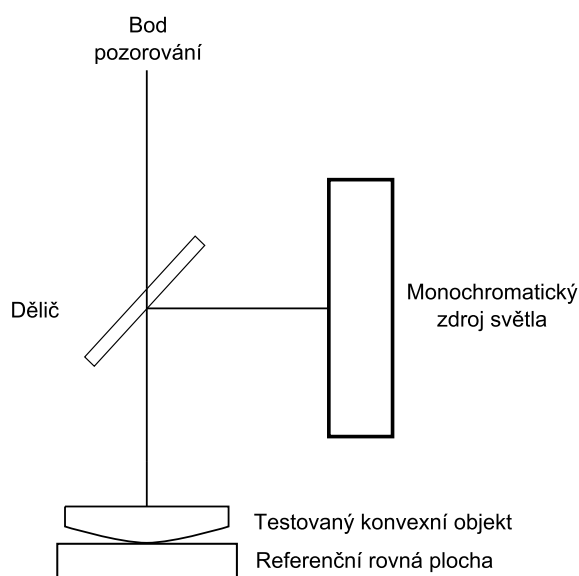
Newtonův interferometr

Za Newtonův interferometr se obecně považuje jakýkoli systém, využívající dvou povrchů, které jsou nasvíceny monochromatickým nebo bílým světlem

⁶Koherentní zdroj světla je takový zdroj, jehož frekvence záření a rozdíl fází světelných paprsků je stále stejný [7].

viz. obrázek 1.4. Toto sestavení umožní pozorování tzv. Newtonových proužků (viz. obrázek 1.3). Na obrázku 1.4 je použitý rovný a konvexní povrch, což vytváří vzduchovou mezeru od bodu spojení těchto dvou povrchů. Vzduchová mezera znemožní pozorování Newtonových kroužků lidským okem, proto je nutné kroužky zesílit. Vzduchovou mezeru můžeme minimalizovat opracováním spodního rovného povrchu tak, aby do něj konvexní povrch zapadl. Za těchto podmínek může být tloušťka mezery eliminována na tloušťku několika málo světelných vln.

Jako zdroj světla může být použita rtuťová nebo sodíková výbojka s monochromatickým filtrem. Pomocí Newtonových proužků lze rozlišit rovinné, sférické, kónické, cylindrické a zakřivené (astigmatické) povrchy [2].



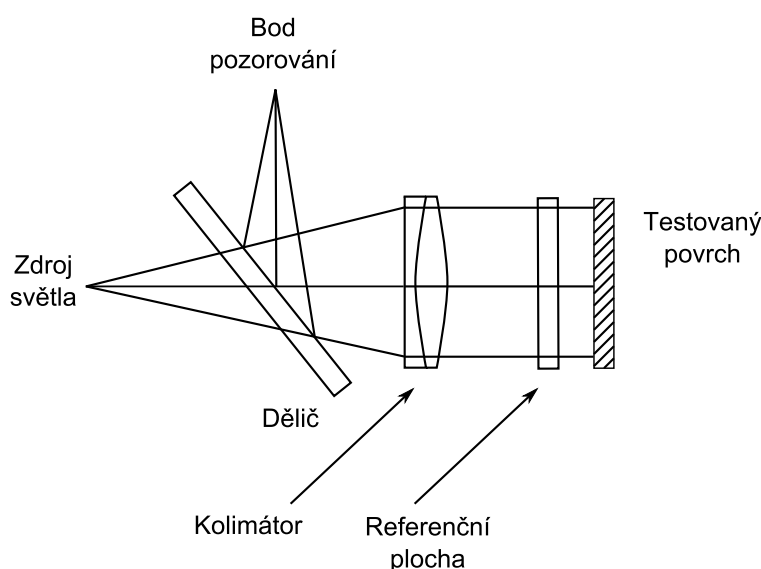
Obrázek 1.4: Schéma Newtonova interferometru

Fizeaův interferometr

Zatímco Newtonův interferometr podává nejlepší výsledky, pokud je vzduchová mezera mezi testovaným a referenčním povrchem co nejmenší, Fizeaův interferometr může pracovat i s relativně velkou vzduchovou mezerou (i několik

cm). Zdrojem světla může být sodíková nebo rtuťová výbojka a obdržený interferenční obrazec odpovídá kontuře chyb na testovaném povrchu. Jestli je testovaný objekt konvexní nebo konkávní lze jednoduše zjistit jemným zatlačením na kraji testovaného objektu. Je-li tvar povrchu konkávní, střed interferenčního obrazce se posune směrem od místa tlaku. Pokud se střed obrazce posouvá směrem k tomuto místu, testovaný povrch je konvexní [1].

Fizeauův interferometr je v optické výrobě velmi často používán, protože umožňuje rychlé zhodnocení rovinnosti, paralelity a tloušťky optických elementů. V dnešní době lze výsledné proužky zpracovávat pomocí počítače, což umožňuje prostorové zobrazení testovaného povrchu [2].



Obrázek 1.5: Schéma Fizeauova interferometru

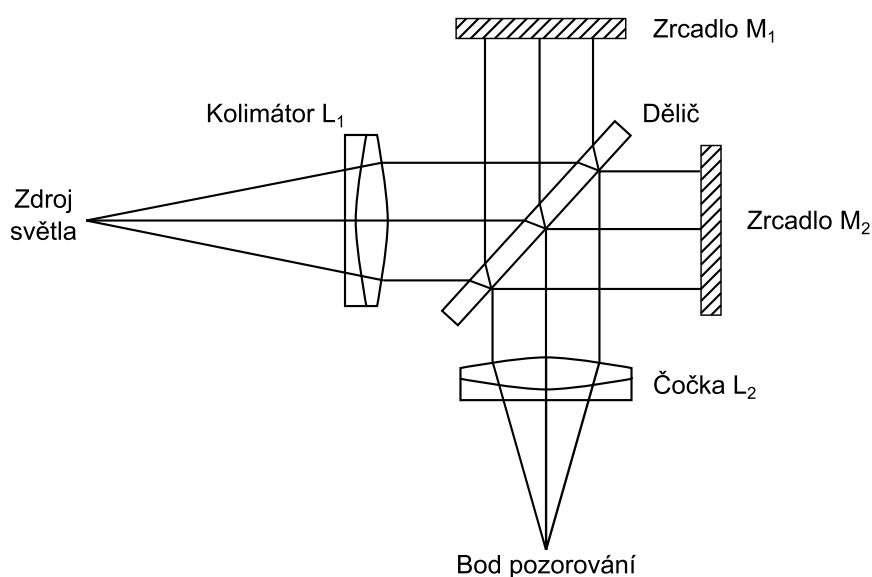
Twyman-Greenův interferometr

Tento interferometr vznikl modifikací Michelsonova interferometru. Liší se použitím kolimační čočky, což umožní pozorování interferenčních proužků. Délka referenční a testovací optické dráhy může mít díky principu Twyman-Greenova interferometru velmi malý rozdíl, takže výsledné interfe-

renční proužky jsou velmi dobře viditelné⁷ [1].

Na obrázku 1.6 je jeho základní konfigurace. Po nasvícení tohoto systému bodovým monochromatickým světlem, je světlo kolimováno prostřednictvím čočky L_1 . Vytvoří se rovinná vlnoplocha, která je rozdělena děličem. Do děliče se od zrcadel M_1 a M_2 paprsky odrazí zpět a výsledkem je vznik interferenčního obrazce, který může být po promítnutí na stínítko pozorován lidským okem pomocí čočky L_2 [5].

Twyman-Greenův interferometr se používá ke zjištění vad optických prvků, jako jsou hranoly, čočky, skleněné desky atd. Pokud má testovaný vzorek dokonale rovný povrch, u vracejících se vln nedochází k interferenci a nevzniká tak žádný interferenční obrazec. Pokud plocha není dokonale rovná, vznikne fázový rozdíl mezi vlnami odraženými od zrcadla a vzniklý interferenční obrazec ukáže nedokonalosti vzorku. Pokud je jedno zrcadlo pohyblivé, lze měřit vzdálenosti [2].

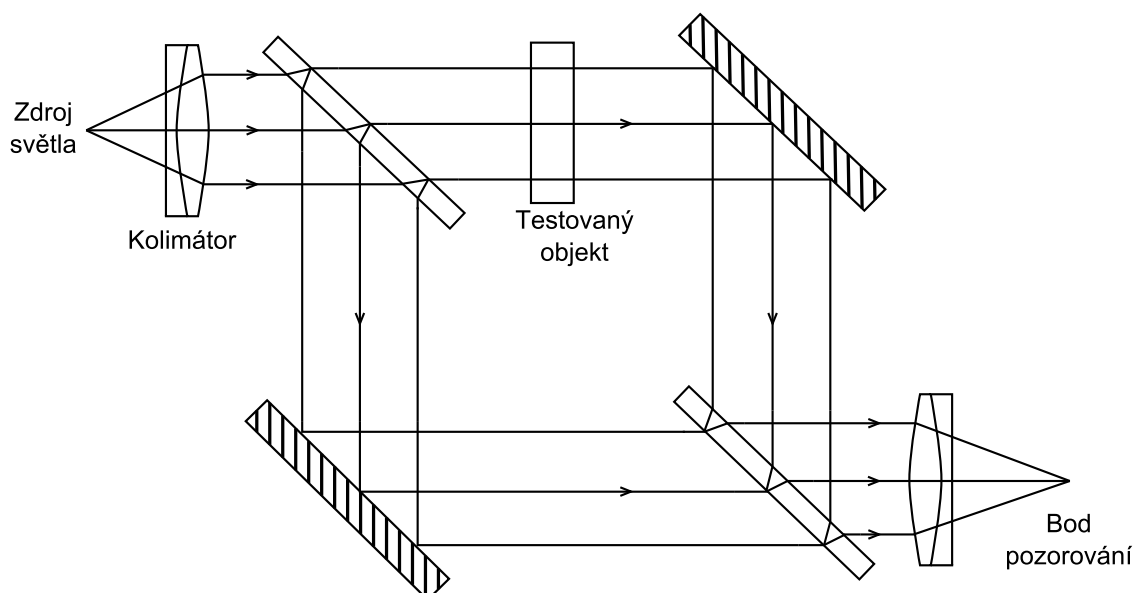


Obrázek 1.6: Schéma Twyman-Greenova interferometru

⁷Interferenční proužky mohou být viditelné i pro velké rozdíly optických drah, v tomto případě ale musí být použitý vysoce koherentní zdroj světla.

Mach-Zehnderův interferometr

Mach-Zehnderův interferometr má několik výhod oproti Twyman-Greenovo systému. Například vzorky s vysokou aberací je lepší testovat pouze jedním průchodem paprsku světla. Další výhodou je to, že oblast lokalizace proužků se může shodovat s testovaným objektem, takže může být použitý rozšířený monochromatický zdroj s vyšší intenzitou. Jeho nevýhodou je náročná seřizitelnost. Mach-Zehnderův interferometr se používá např. ke studiu průtoku kapalin, přenosu tepla v plasmatu [2].



Obrázek 1.7: Schéma Mach-Zenderova interferometru

Foucault test

Foucaultův nožový test je jedním z nejjednodušších optických testů. Přes svoji jednoduchost dokáže tento test zobrazit vady na povrchu zrcadla a snadno zjistit střed křivosti konvexního povrchu.

Je-li povrch zrcadla nasvícen ze vzdálenosti rovné jeho středu křivosti, pak se v tomto bodě odražené paprsky sbíhají a lze v něm pozorovat kompletně nasvícený povrch testovaného zrcadla. Pokud se pozorovatel pouze dotkne ostrou čepelkou tohoto bodu, povrch zrcadla je okamžitě kompletně zastíněn. Pokud se čepelkou přibližuje k optické ose před nebo za středem křivosti, zastíněná plocha se postupně zvětšuje z jedné nebo druhé strany. Princip testu je detailněji popsán na začátku třetí kapitoly [6].

Ronchi test

Ronchi test vychází z Foucaultova nožového testu, rozdíl je v tom, že místo ostré čepelky se používá tzv. Ronchi mřížka. Mřížkou může být např. sklíčko, na které jsou naleptány proužky o určité hustotě. V krajním případě lze použít i průhlednou fólii, na kterou jsou proužky vytisknuty laserovou tiskárnou.

Testovaný objekt je pak přes mřížku nasvícen i pozorován. Zatímco u Foucaultova testu byl objekt nasvícen celý, u Ronchi testu lze pozorovat nasvícené a zastíněné proužky tzv. ronchigramy. Proužky se snadněji vyhodnocují, protože lze porovnávat jejich tloušťku a tvar. Každý typ povrchu má jiný ronchigram, a každá vada na daném povrchu tento ronchigram nějakým způsobem modifikuje [1, 2].

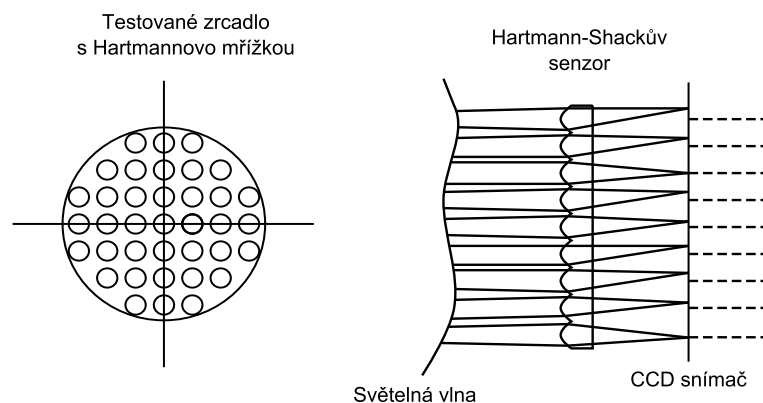
Hartmann-Shack test

Hartmannův test neměří rozdíl dvou optických drah, jako tomu je např. u Twyman-Greenova či Fizeauova interferometru, ale měří sklon světelné vlnoplochy.

Velká deformace vlnoplochy může způsobit malé změny ve sklonu, pokud je rozšíření této deformace velké. Analogicky malá deformace vlnoplochy může způsobit velké změny ve sklonu vlnoplochy, pokud je rozšíření této deformace velké.

Hartmannův test používá pro vyhodnocení tzv. Hartmannovu mřížku, za-

tímco Hartmann-Shackův test využívá k vyhodnocení tvaru vlnoplochy CCD snímač. Obrázek 1.8 schematicky zobrazuje Hartmannovu desku před testovaným zrcadlem a Hartmann-Shackův senzor. U CCD čipu jsou zobrazeny optické osy jednotlivých čoček Hartmann-Shackova senzoru. Na základě tvaru světelné vlnoplochy se mění poloha ohnisek jednotlivých čoček a vyhodnocuje se rozdíl jejich polohy oproti optické ose čoček [2].



Obrázek 1.8: Vlevo Hartmann mřížka před testovaným zrcadlem. Vpravo Hartmann-Shack senzor

1.3 Shrnutí

Kapitola 1 obsahuje souhrn základních informací o světle a interferenci světelných vln. V kapitole jsou popsány typy elektromagnetických vln, jejich vlnové délky a vlnové délky viditelného světla. Dále je vysvětleno, že interferenční jev vzniká při superpozici dvou světelných vln a ve výsledku se určité části vln zesílí a jiné vyruší. Díky tomu vznikne interferenční obrazec, který lze zobrazit pomocí interferometrů a interferometrických testů. Těmto zařízením se věnuje druhá část první kapitoly, kde jsou jednoduše popsány principy těchto zařízení. Interferometry se především používají pro bezdotyková a nedestruktivní měření a testování optických prvků i dalších fyzikálních veličin (vzdálenost, teplota, atd.).

2 Teorie o testování

Ve druhé kapitole se od obecného pohledu přesuneme k podrobnému rozboru Foucaultova a především Ronchi testu. Je zde stručně popsán jeho princip a jaké výsledky je možné testováním získat. Základní princip těchto testů je stejný a Ronchi test je víceméně modifikace Foucaultova testu.

Interferometrické testy nachází uplatnění ve výrobě optických čoček a zrcadel. Pomocí těchto optických testů se testuje kvalita povrchu vyráběného optického prvku. Na základě těchto výsledků lze zjistit, zda-li je optický prvek vyroben přesně podle požadavků a nebo jestli má nějaké nedostatky, které jsou potřeba opravit.

Základním principem Foucaultova a Ronchi testu je nasvícení optického členu z jeho středu křivosti. V tomto bodě se promítne nasvícený obraz testovaného prvku a je možné ho vyhodnotit (např. nalézt nedostatky na kvalitě povrchu, zjistit střed křivosti). Na obraze se projeví všechny vady a obvykle se dá zjistit, na jakých místech se tyto vady nachází a jakého typu jsou.

2.1 Foucaultův nožový test

Přestože je Foucaultův test velmi jednoduchý, je velice přesný a citlivý. Na stínovém obraze optického prvku zobrazí všechny odchylky od ideální kulové plochy a to s přesností na desetiny nm [9].

Je-li do středu křivosti optického členu umístěn vhodný zdroj světla, pak se do stejného bodu promítne nasvícený obraz testovaného optického členu. To je vlastnost, na které je Foucaultův test založen. V tomto bodě však není

možné obraz pozorovat, protože je obraz odražen zpět do světelného zdroje, proto je světelný zdroj nepatrně posunut na jednu stranu od optické osy, obraz se pak promítne symetricky podle optické osy. Princip Foucaultova testu je znázorněn na obrázku 2.1, kde S je svítící štěrbinová, R je poloměr křivosti zrcadla a pohyblivá ostrá čepelka (označeno šipkou) se posouvá kolmo k optické ose zrcadla v bodech B_1 , B_2 a B_3 .

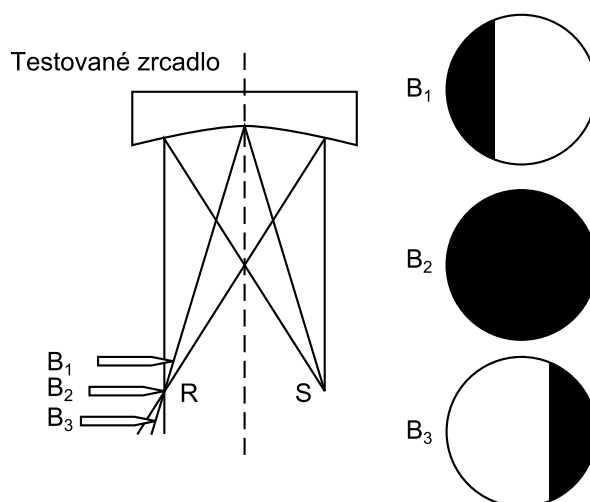
Podíváme-li se do bodu B_2 ze vzdálenosti asi 1 cm dále od zrcadla, uvidíme zrcadlo celé rovnoměrně osvětlené. Pokud je při tomto pozorování čepelka posouvána kolmo k optické ose zrcadla, mohou nastat 3 případy.

1. Při posouvání čepelky směrem k ose optického členu je vidět, jak přes osvětlené zrcadlo postupuje stín stejným směrem, jako je pohyb čepelky. V tom případě je čepelka blíže bodu B_1 , tj. mezi středem křivosti a optickým členem - bod před středem křivosti.
2. Pokud stín postupuje opačným směrem, než je směr pohybu čepelky, je čepelka blíže bodu B_3 , za středem křivosti optického členu.
3. Je-li čepelka umístěna přesně do bodu B_2 , tedy do středu křivosti optického členu, osvětlené zrcadlo se pak zatmí téměř současně z obou stran. Polovina vzdálenosti R je ohnisková vzdálenost optického členu (u sférických členů). Tímto způsobem je tedy možné přesně změřit střed křivosti optického prvku.

Při Foucaultově zkoušce se nejčastěji hledá případ č. 3. Podle toho, co je vidět na ploše optického členu, je možné jeho plochu zhodnotit po optické stránce. Když je čepelka přesně v bodě B_2 , vzdálenost od testovaného objektu k čepelce odpovídá středu křivosti objektu. Při nasvícení se projeví i nepatrné odchylky plochy (desetiny nm) od dokonalé sféry.

Je-li plocha zrcadla všude rovnoměrně nasvícená, bez jakýchkoliv světlejších nebo tmavších míst, pak je plocha optického členu skutečně dokonale kulová. Objeví-li se na ploše světlejší a tmavší místa, plocha není dokonale kulová

a podle obdrženého obrazu lze rozpoznat a určit, kde a jak se plocha optického členu odchyluje od sféry. Po provedení několika testů je možné vypožorovat, že světlá místa na jedné straně optické osy jsou symetrická se stíny na druhé straně osy. Větší odchylky plochy od přesné sféry se projeví větším kontrastem mezi světlejšími a tmavšími částmi, zatímco u menších vad je kontrast menší [2, 6, 9].

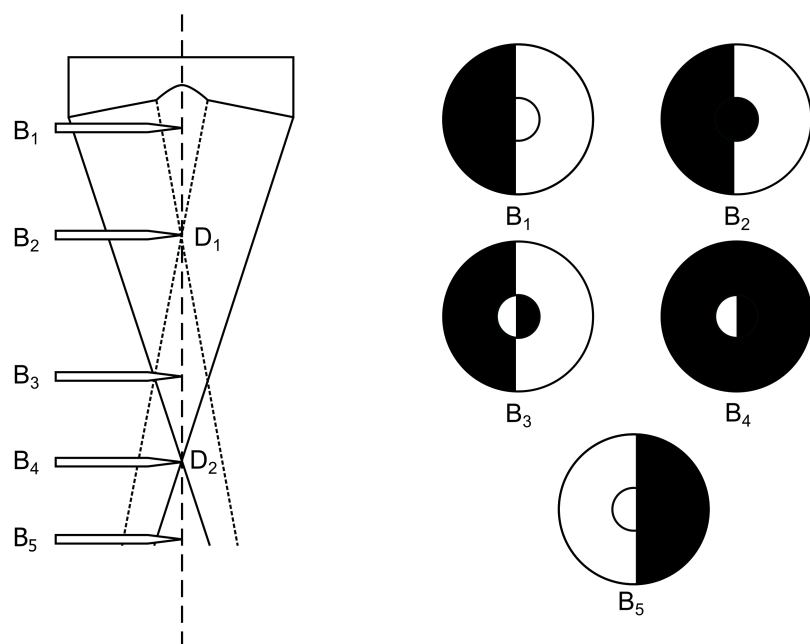


Obrázek 2.1: Princip Foucaultova testu na dokonalé sféře. S je zdroj světla, R označuje střed křivosti v oblasti pozorování. Body B_1 - B_3 naznačují umístění čepelky a vpravo je zobrazen odpovídající obrazec.

Testování povrchu s vadou

Výše je popsáno chování Foucaultova testu v případě, že testovaný optický člen má tvar dokonalé sféry. Obrázek 2.2 ukazuje situaci, kdy měřený prvek není dokonale sférický, uprostřed členu je vada s jiným rádiusem, než má celý optický prvek. Při pozorování se vada projeví dalším kruhem v pozorovaném obraze, protože se paprsky odráží do jiného bodu [2, 6, 9].

Na obrázku 2.2 jsou vyznačeny body B_1 až B_5 , protože může nastat 5 případů, bod D_2 střed křivosti optického členu a zároveň bod, ze kterého je prvek nasvícen.



Obrázek 2.2: Princip Foucaultova testu na sféře s vadou. R označuje střed křivosti v oblasti pozorování. Body $B_1 - B_5$ naznačují umístění čepelky a vpravo je zobrazen odpovídající obrazec. D_1 je střed křivosti vady a D_2 je střed křivosti celého optického členu, zároveň je objekt z othoto bodu nasvícen.

1. Čepelka je poblíž bodu B_1 , před ohniskem odražených paprsků od vady. Nejprve je vidět stín pohybující se stejným směrem jako čepelka ve velké kružnici a malá kružnice je celá nasvícená. Od místa, kde čepelka protne paprsky odražené od vady v optickém členu, stín postupuje ve stejném směru i v malé kružnici. V těchto místech není možné vadu odhalit.
2. Když bude čepelka v bodě B_2 posouvána směrem k optické ose, stín bude postupovat v jejím směru pohybu. Ve chvíli, kdy se čepelka dotkne bodu D_1 , menší kružnice se okamžitě zastíní. Velká kružnice je zastíněna jen z části, takže je vada jasně vidět.
3. Při posouvání čepelky v okolí bodu B_3 stín ve velké kružnici postupuje ve směru čepelky. Ta se nyní nachází za středem křivosti vady a stín v menší kružnici postupuje z opačné strany pohybu čepelky.

4. Jakmile se čepelka dotkne osy v bodě B_4 , velká kružnice se okamžitě zastíní a na malé kružnici je viditelný postupující stín v opačném směru pohybu čepelky. Čepelka se nachází ve středu křivosti zrcadla.
5. V bodě B_5 se čepelka nachází za středem křivosti vady, i celého měřného členu. Stín tedy postupuje v obou kružnicích proti směru pohybu čepelky.

2.2 Ronchi test

Výše už bylo zmíněno, že Ronchi test vychází z Foucaltova nožového testu. Liší se především v tom, že místo ostré čepelky je použita speciální mřížka (Ronchi mřížka) o různé hustotě proužků na mm. Ronchi mřížka tímto zjednodušuje vyhodnocení získaného obrazu prvku. Při testování prvku mající tvar dokonalé sféry, vypadá jeho nasvícený obraz jako na obrázku 2.3¹.

Je patrné, že proužky jsou vodorovné a stejně široké. Pokud má testovaný objekt nějakou vadu, projeví se to na tvaru těchto proužků. Na základě tvaru jejich deformace je možné zjistit o jakou vadu se jedná a lokalizovat ji.



Obrázek 2.3: Ronchigram dokonalé sféry

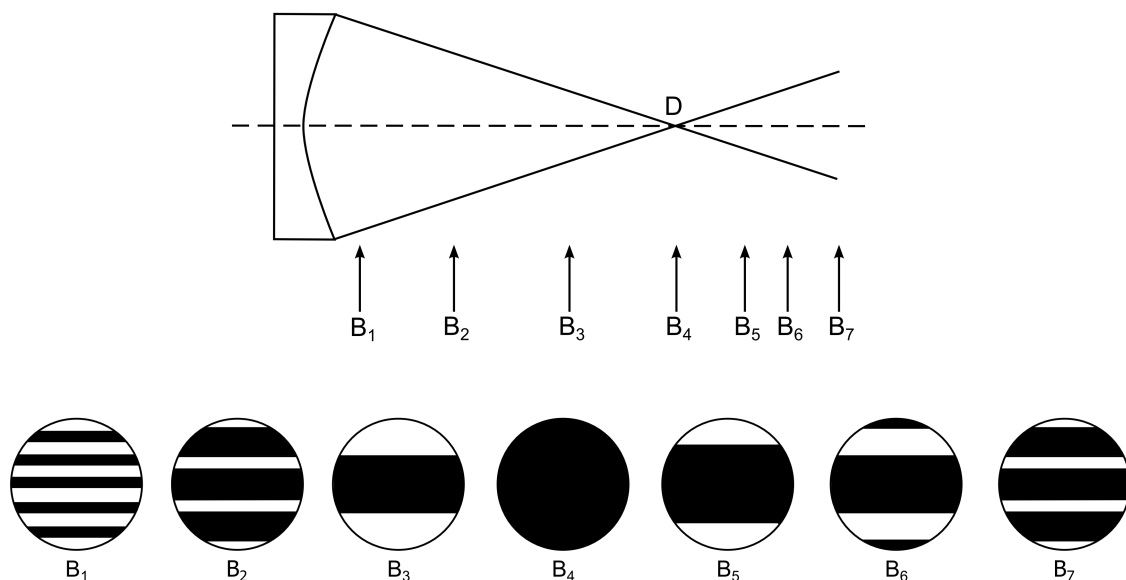
¹Obdržené proužky většinou nejsou perfektně ostré a rovné, uvedená *kresba* pouze znázorňuje, jak by vypadal ronchigram opravdu dokonalé sféry.

2.2.1 Princip Ronchi testu

Základní princip je stejný, jako u Foucaultova testu, v případě Ronchi testu se nepoužívá ostrá čepelka, ale nasvícení je provedeno přes tzv. Ronchiho mřížku. Aby bylo obraz možné pozorovat, musí být zdroj posunutý na jednu stranu od optické osy. Obraz se pak promítne symetricky podle osy [9]. Pro obdržení co nejkvalitnějších ronchigramů je vhodné, aby vzdálenost od osy byla co nejmenší, a použít stejnou mřížku jak pro nasvícení, tak pro pozorování. Je možné použít mřížky dvě, kde je jedna připevněna na zdroj světla a druhá je použita k pozorování. V tomto případě je nutné pozorovací mřížku seřadit podle statické mřížky umístěné na zdroji. Pak by bylo možné pozorovat ronchigramy přímo na ose ve středu křivosti a tím se zamezí vzniku složené aberace [1]. Metoda dvou mřížek je obtížnější na seřízení, protože pokud nejsou mřížky správně seřizeny, klesá kontrast obdrženého obrazce.

V případě testování dokonale sférického optického členu mohou nastat 3 případy. Pozorování obrazce před středem křivosti, ve středu křivosti a za středem křivosti. Na obrázku jsou vyznačeny body B_1 až B_7 , kde se tři nachází před středem křivosti, jeden ve středu křivosti a tři za středem křivosti [9].

1. Při pozorování optického členu přes mřížku v okolí bodu B_1 jsou zastíněné proužky užší, než proužky osvětlené. Je-li mřížka posouvána po ose směrem ke středu křivosti do bodu B_4 , zastíněné proužky se rozšiřují a jejich množství na pozorovaném obrazci se zmenšuje (ilustrováno body B_2 a B_3).
2. Postupným posouváním mřížky do středu křivosti v bodě B_4 , vznikne na obrazci jediný proužek, který při pozorování optického členu z jeho středu křivosti zastíní celý obrazec. V případě, že je obraz optického členu kompletně zastíněn, testovaný objekt se nachází ve středu křivosti (bod D).
3. Ve třetím případě, kdy je objekt pozorován za středem křivosti, je chování



Obrázek 2.4: Princip Ronchiho testu na dokonale sférickém zrcadle. Body B_1 až B_5 označují místo pro umístění mřížky na optické ose zrcadla.

proužků oproti pozorování před středem křivosti opačné. Přibližováním k bodu B_5 se proužek zmenšuje směrem ke středu obrazce. Postupně začnou z horní a dolní části obrazu pronikat další proužky. Obrázek 2.4 v bodě B_6 zobrazuje případ, kdy je vidět široký centrální a části dvou krajních proužků. Dalším posunem mřížky se všechny proužky budou postupně zužovat a na obraze se jich bude objevovat více - bod B_7 . [2, 9]

Testování povrchu s vadou

Na obrázku 2.5 je vidět chování proužků u objektu s vadou. V tomto případě je vadou plocha ve středu objektu, která má jiný střed křivosti, než zbytek optického členu, obdobně, jako u výkladu Foucaultova testu. Na obrázku 2.5 je znovu vyznačeno 5 bodů a obrazce získané pozorováním přes mřížku v okolí těchto bodů.

1. Při pozorování v okolí bodu B_1 se pozorovací mřížka nachází před oběma

středů křivosti D_1 a D_1 . Z toho důvodu jsou v obou kružnicích na obrazci vidět úzké zastíněné proužky a širší nasvětlené proužky.

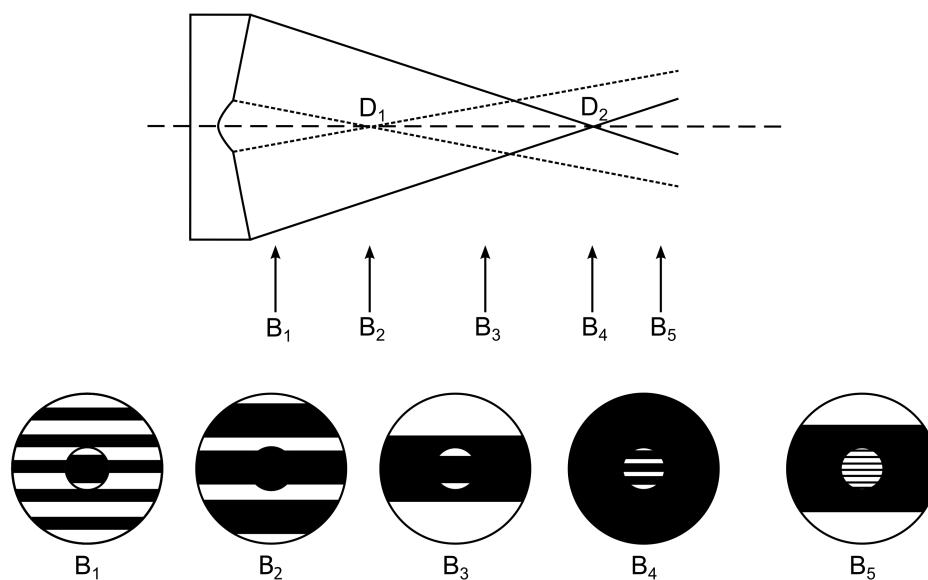
2. Postupným posouváním mřížky po optické ose objektu do středu křivosti D_1 , se tmavé proužky rozšiřují. V malé kružnici se rozšiřují rychleji, protože střed křivosti vady je blíže, než střed křivosti celého optického členu. Při dosažení středu křivosti D_1 se malá kružnice zatmí. Ve větší kružnici se oproti pozorování v bodě B_1 zastíněné proužky rozšířily.
3. V okolí bodu B_3 se mřížka nachází za středem křivosti vady a před středem křivosti celého objektu. V malé kružnici se centrální proužek začíná zužovat a ve velké kružnici se zastíněné proužky stále postupně rozšiřují. Ve velké kružnici už dominuje široký centrální proužek.
4. Po dosažení středu křivosti - v bodě D_2 , je centrální proužek tak velký, že zastíní celou kružnici. V malé kružnici se proužky stále zužují, protože se mřížka nachází za středem křivosti vady. Dalším posunutím mřížky směrem k bodu B_5 , se začnou zastíněné proužky postupně zužovat i ve velké kružnici [2, 9].

Výše byl shrnut základní princip Foucaultova a Ronchi testu. Bylo vysvětleno chování v případě měření dokonale sférického optického členu, i členu s povrchovou vadou. V další části kapitoly nastíníme teoretický pohled na podstatu Ronchi testu.

2.2.2 Geometrická teorie

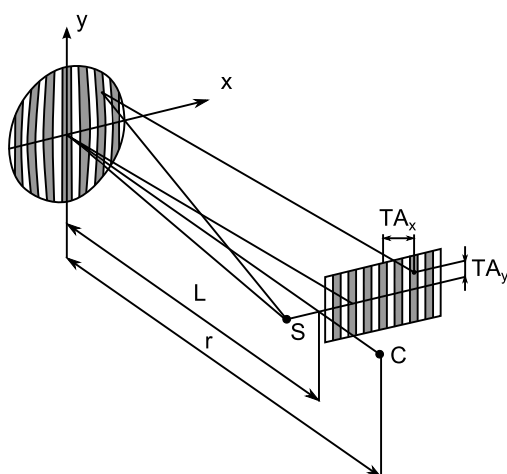
Ronchi test lze popsat dvěma ekvivalentními modely. Geometrickým, který proužky interpretuje jako stíny proužků Ronchi mřížky a fyzikálním. Fyzikální model interpretuje proužky jako stíny způsobené difrakcí a interferencí. Oba modely v rámci jistých mezí podávají stejné výsledky [2].

V roce 1965 Malacara popsal [2], že Ronchi test měří transversální aberaci



Obrázek 2.5: Princip Ronchiho testu na sférickém zrcadle s vadou. Body B_1 až B_5 označují místo pro umístění mřížky na optické ose zrcadla a D_1 a D_2 označuje polohy středů křivosti.

TA (viz. obrázek 2.6), kde je objekt i obraz na optické ose, takže TA se měří od osy.



Obrázek 2.6: Geometrie Ronchi testu

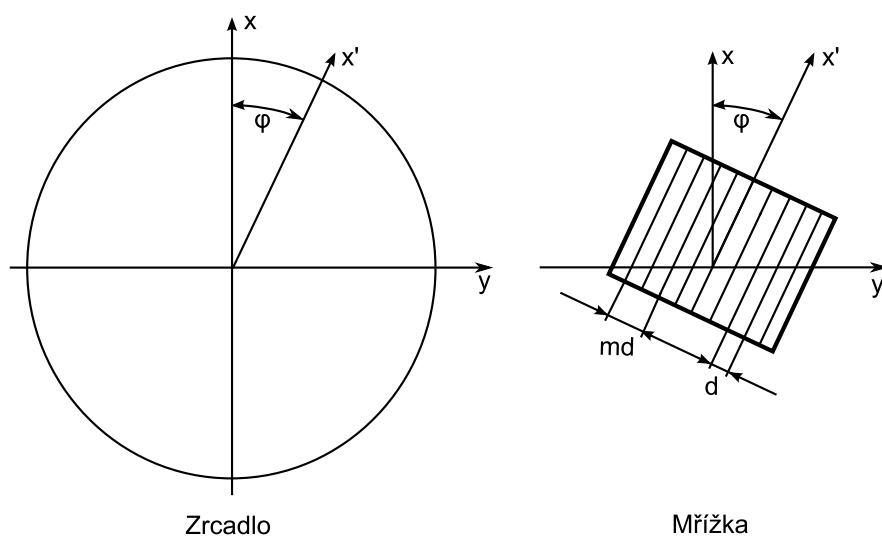
Vlnová aberace na výstupní pupile testovacího systému je definována jako

$$\frac{dW}{dx} = -\frac{TA_x}{r}; \quad \frac{dW}{dy} = -\frac{TA_y}{r} \quad (2.1)$$

kde r je vzdálenost testovaného optického členu od mřížky. Pokud je rozostření mřížky malé, může být tato vzdálenost aproximována rádiusem zakřivení vlnoplochy. Při použití Ronchi mřížky s mezerou d mezi sousedními proužky pro bod (x, y) na m -tém proužku platí

$$\frac{dW}{dx} \cos \varphi - \frac{dW}{dy} \sin \varphi = -\frac{md}{r} \quad (2.2)$$

kde se předpokládá, že se mřížka pootočí o úhel φ podle osy y (viz. obrázek 2.7). Toto je základní rovnice geometrického modelu Ronchi testu. V námi užitém základním uspořádání k otočení mřížky nedochází a tedy uvažujeme $\varphi = 0^2$ [2].



Obrázek 2.7: Orientace mřížky a vlnoplochy

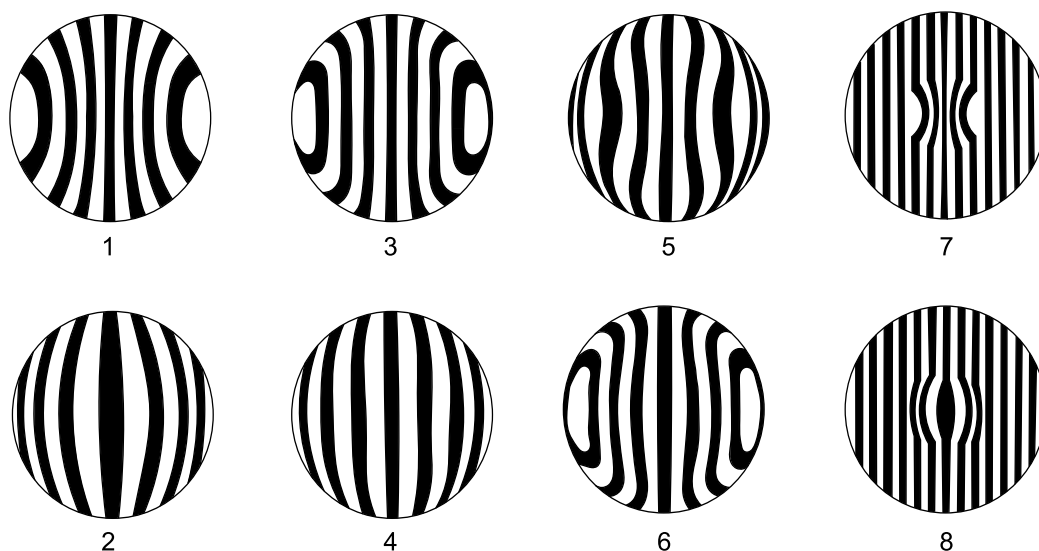
²Většinou uvažujeme jen rotačně symetrické elementy (viz. dále).

Asférické povrchy

Obecně se Ronchi test používá především k testování sférických povrchů, jeho užití lze ale rozšířit i pro testování asférických optických členů, včetně velkých zrcadel pro astronomické teleskopy [2].

Vyhodnocení vlnoplochy

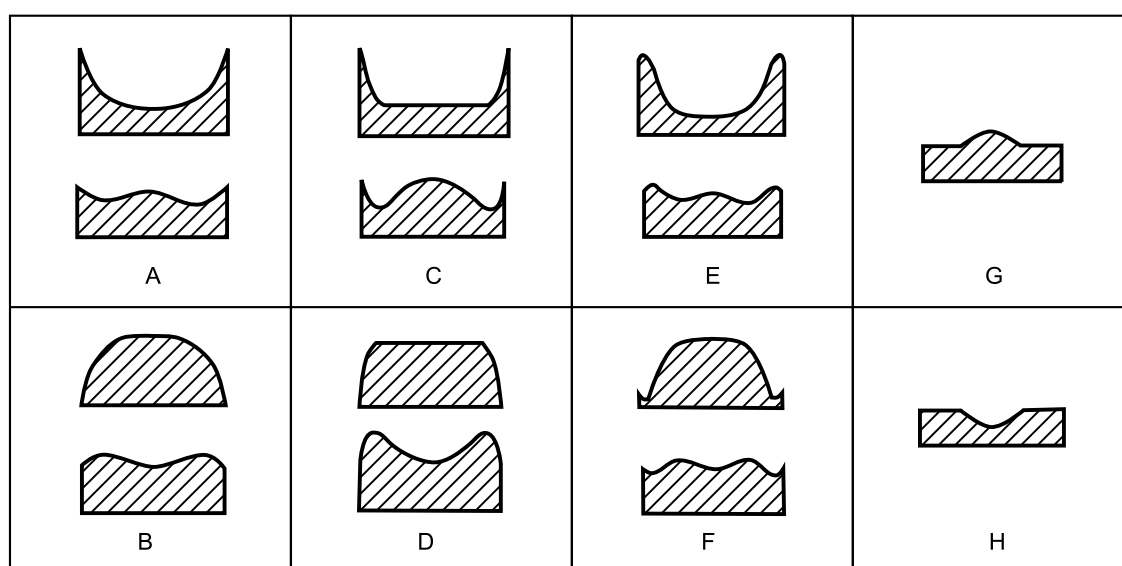
Z obdržného ronchigramu lze určit deformace optického členu. Kvalitativní informace o deformacích testovaného povrchu lze vyhodnotit pouhým pozorováním výsledného obrazce. Na obrázku 2.8 jsou vyobrazeny ronchigramy pro různé optické členy. Tabulka 2.1 těmto obrazům přiřazuje kvalitativní povrchové vady zrcadel a optických čoček. K otestování optické čočky je potřeba za čočku umístit rovinné zrcadlo. Světelný svazek pak projde optickou čočkou a od zrcadla se odrazí zpět do středu křivosti čočky. Pomocí Ronchi testu lze provést i kvantitativní analýzu, ale v našem případě se touto problematikou nebudeme zabývat [2].



Obrázek 2.8: Ronchigramy typických povrchových vad.

Ronchigram	Povrch			
	Zrcadlo		Čočka	
	Před středem	Za středem	Před středem	Za středem
1	A	B	B	A
2	B	A	A	B
3	C	D	D	C
4	D	C	C	D
5	E	F	F	E
6	F	E	E	F
7	G	H	H	G
8	H	G	G	H

Tabulka 2.1: Vztahy mezi ronchigramy na obrázku 2.8 a povrchovými vadami na obrázku 2.9. Před/Za středem odpovídá umístění Ronchi mřížky od středu křivosti.



Obrázek 2.9: Povrchové deformace pro ronchigramy na obrázku 2.8. Vrchní obrázky odpovídají tvaru zrcadla a spodní odpovídají tvaru čočky.

Povrchy s rotační symetrií

Za předpokladu, že je testované těleso rotačně symetrické, postačí k vyhodnocení kvality jeho povrchu jediný ronchigram s $\varphi = 0^\circ$. V tomto případě se transversální aberace $TA(S)$ v jednotlivých bodech vyhodnocuje změřením průsečíků jednotlivých proužků s osou x^3 (viz. obrázek 2.10). Hodnota S je vzdálenost ze středu ronchigramu k bodu, kde proužek protíná osu x a $TA = md$. Vlnoplocha se pak spočítá integrací $TA(S)$ [2].

Residuální transversální aberace je definována

$$TA(S) = TA(S) - TA_0(S) \quad (2.3)$$

kde $TA(S)$ je celková transversální aberace nedokonalého testovaného povrchu a $TA_0(S)$ je vypočítaná ideální transversální aberace. Z obrázku 2.10 pak lze vyčíst vztah

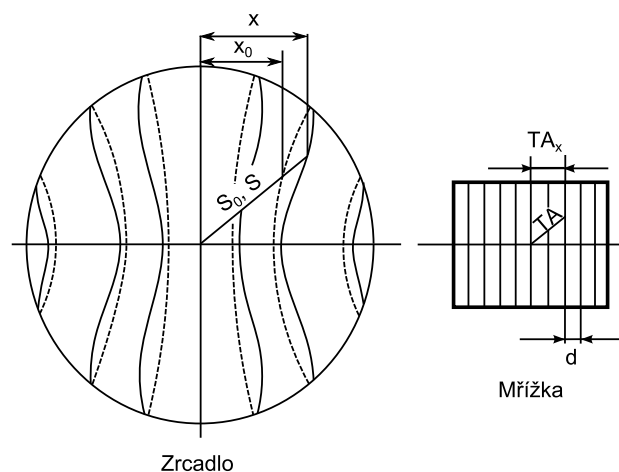
$$\frac{S_0}{x_0} = \frac{S}{x} = \frac{TA(S)}{TA_x} \quad (2.4)$$

Průsečíky ideálních i reálných proužků leží na ose x směrem od středu povrchu optického členu a podle vztahu $TA_0(S_0) = TA(S)$ jsou tyto body stejně promítnuty i na mřížce [2].

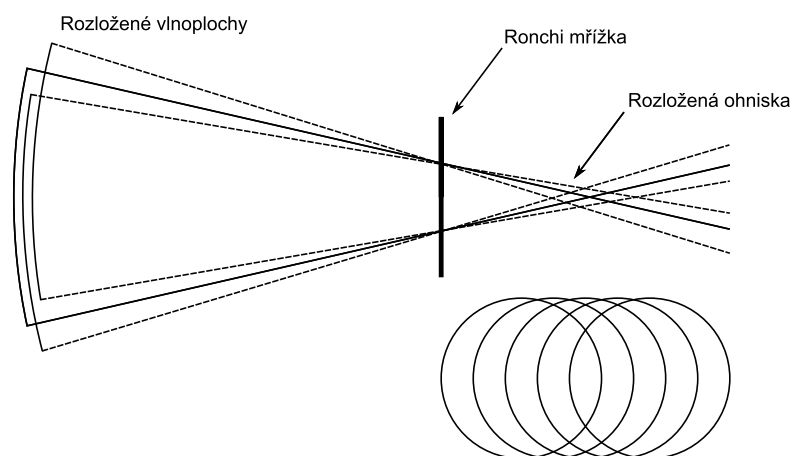
2.2.3 Fyzikální model

Ronchi test je z fyzikálního pohledu interferometr. O tom psal Ronchi už v původní studii z roku 1923 [17], když se pokoušel postavit kvalitní fyzikální model testu. Při těchto pokusech přišel na to, že Ronchiho mřížka se chová jako difrakční mřížka, která vytváří mnoho difrakčních řádů, kde každý dává posunutý obraz pupily [2].

³V případě otočení mřížky o úhel $\varphi = 90^\circ$ se vyhodnocují průsečíky s osou y .



Obrázek 2.10: Ronchigram plochy s rotační symetrií



Obrázek 2.11: Fyzikální model Ronchi testu

2.3 Shrnutí

V kapitole je popsán princip Foucaultova a Ronchi testu. Foucaultův nožový test je posán, protože z něj Ronchi test přímo vychází. U obou testů je popsáno chování při testování dokonale sférického optického členu a sférického členu s vadou. Druhá část kapitoly obsahuje detailnější informace o teorii Ronchi testu a je především zaměřena na geometrický přístup k popisu Ronchi testu.

3 Konstrukce Ronchi testu

Následující kapitola popisuje proces konstrukce Ronchi testu od výběru součástek až po testování funkčnosti a porovnání obdržených výsledků. Součástky byly vybírány z obchodů ThorLabs¹ a EdmundOptics² s ohledem na variabilitu pro snadné provádění změn na laboratorním prototypu. V tomto ohledu je výhodou, že součástky od firmy ThorLabs, jsou konstruovány tak, aby spolu byly kompatibilní.

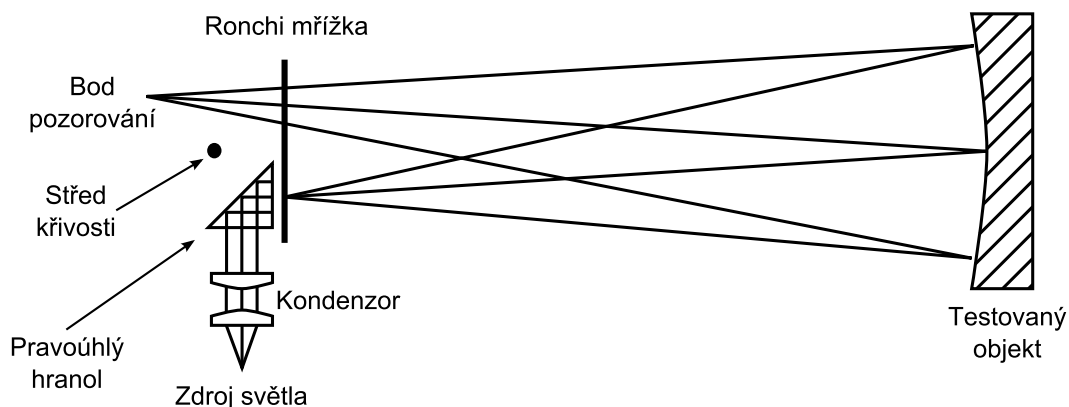
Vzniklo několik prototypů, kde už první model naznačil, že Ronchi test je funkční a mohli bychom obdržet dobré výsledky měření. Od druhého prototypu je k pozorování využita kamera pro záznam měřeného ronchigramu.

3.1 Schéma a součástky

Základ pro realizaci Ronchi testu je zdroj světla a Ronchi mřížka. Funkční princip zachycuje obrázek 3.1, kde je kromě světla a mřížky použit pravoúhlý skleněný hranol a kondenzor pro usměrnění světelných paprsků. Hranol láme světelné paprsky o 90°. To ulehčuje pozorování, protože měřený objekt je přes mřížku nasvícen i pozorován. Světlo je potřeba ještě homogenizovat, proto je vhodné mezi zdroj světla a kondenzor umístit difuzor.

¹<http://www.thorlabs.de>

²<http://www.edmundoptics.com>



Obrázek 3.1: Principiální schéma Ronchi testu

Zdroj světla

Pro kvalitní výsledky měření je důležité zvolit správný zdroj světla. Světlo musí být prostorově homogenní a mít dostatečnou intenzitu. Homogennost světla zajistí rovnoměrné nasvícení měřeného objektu, tím se eliminuje možné přesvícení nebo nenasvícení některé části výsledného ronchigramu, tzn. dosažení dobrého kontrastu v celé pozorované oblasti.

V původním návrhu se počítalo s použitím LED diody nebo halogenové žárovky s monochromatickým filtrem. Rozhodnutí padlo na LED diodu *MCWHL5* z nabídky ThorLabs, protože se dle specifikací intenzity jevila jako vhodný kandidát, mimo to byla též kompatibilní pro zařazení do sestavy bez velkých úprav.

Kondenzor a homogenizer světla

Důvod použití kondenzoru je vidět na schématu 3.1. LED dioda má určitou úhlovou vyzařovací charakteristiku, kondenzor tuto úhlovou charakteristiku eliminuje a vytvoří rovnoměrně široký svazek světla. Homogenizer se stará o konstantní intenzitu světla v celé šířce tohoto svazku.

K homogenizaci světla byla vybrána skleněná homogenizační trubička

o délce 7,5 cm s průměrem 0,5 palce. Kondenzační čočka má stejný průměr jako homogenizer a ohnisko 8 mm. Stejný průměr těchto prvků umožní montáž do palcové závitové trubky ThorLabs.

Filtry

Základním požadavkem na konstrukci byla možnost testování v rámci celého viditelného světelného spektra a to jak v bílém světle, tak i v monochromatickém světle. Pro pokrytí celého spektra byly vybrány relativně ekvidistantní filtry o vlnových délkách 390 nm, 488 nm, 532 nm, 580 nm, 632 nm, 690 nm s pásmem propustnosti maximálně FWHM^3 10 nm v okolí centrální vlnové délky (lépe 3 nm). Filtry jsou kruhové s průměrem 1 palec a pro snadnou změnu těchto filtrů v sestavě je použité karuselové filtrové kolo s šesti pozicemi na kulaté palcové filtry.

Pravoúhlý hranol

Na hranol nejsou kladeny žádné zvláštní požadavky, proto jsme vybrali základní skleněný hranol o velikosti 12,5 mm. Pro jeho uchycení jsme vybrali „Cage cube“ z nabídky ThorLabs, která je určena pro palcovou optiku, proto jsme k uchycení pořídili též i adaptér.

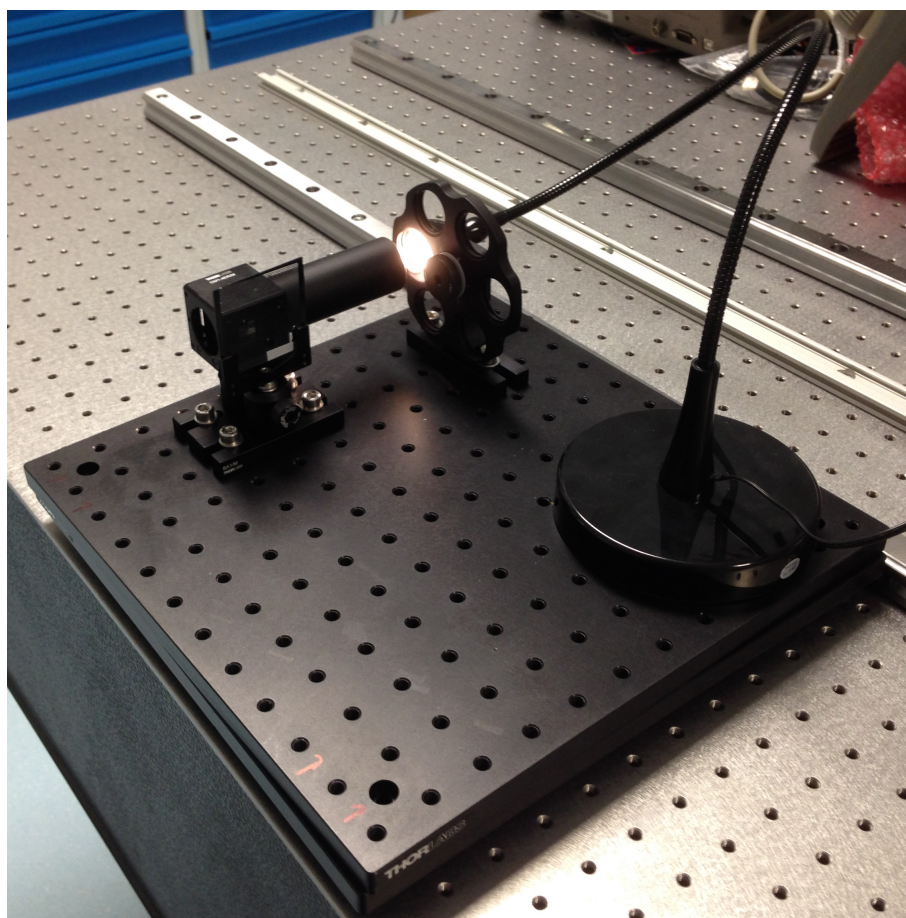
Ronchi mřížky

Původní návrh předpokládal nákup „ultra přesných“ mřížek v obchodě EdmundOptics. V krajním případě lze mřížky vytisknout na průhlednou fólii. Pro naše testování nám byly mřížky zapůjčeny. Mřížky jsou vyrobené na skle, kde byly proužky vytvořeny nanesením a následným leptáním chromu. K prvotnímu měření byly použity dva druhy mřížek s periodou 1 proužek/mm resp. 5 proužků/mm.

³Full Width Half Maximum = Šířka v polovině výšky

3.2 První prototyp

Hlavním cílem prvního prototypu bylo otestovat principiální funkčnost zařízení. Postavili jsme jednoduchý model pomocí konstrukčních prvků od firmy ThorLabs. Nebyly k dispozici všechny součástky a proto jsme vyzkoušeli nahradit zdroj světla stolní lampičkou s LED diodou. Další konstrukční prvky spolu s výsledky a poznatky jsou popsány níže.

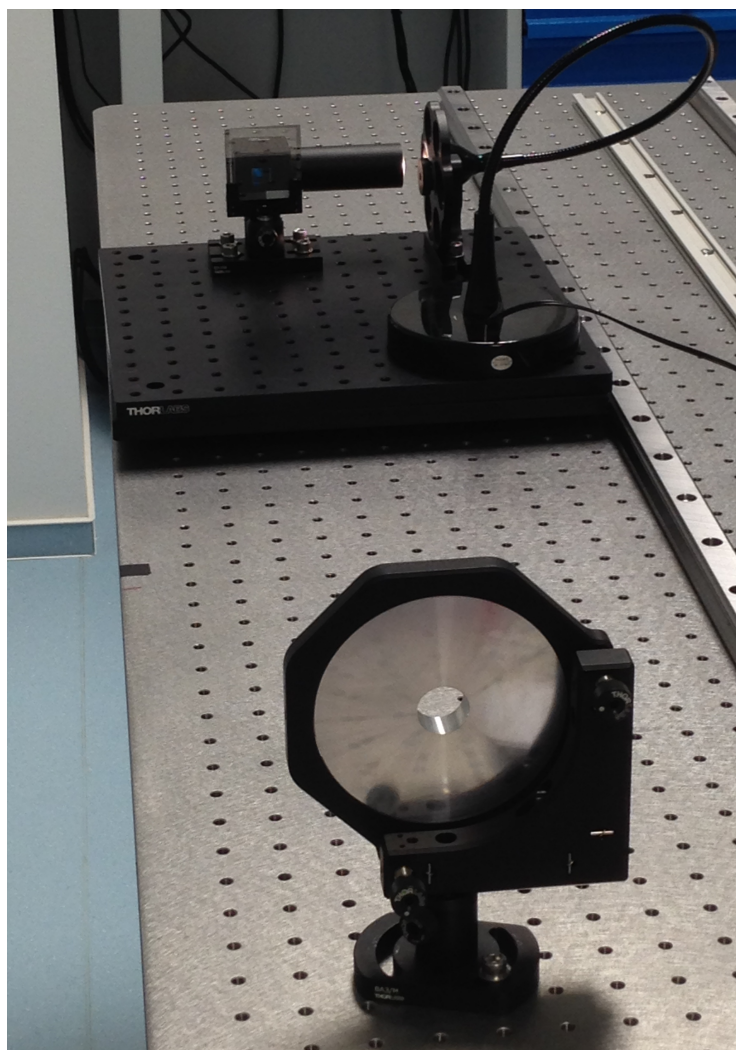


Obrázek 3.2: První prototyp

Na obrázku 3.2 je fotografie sestaveného modelu. Základnu tvoří "konstrukční" deska ThorLabs 30 x 30 cm, ke které je přišroubované kolečko na filtry. Dále jsou na desce dva stojánky sestavené ze součástek firmy ThorLabs, na kterých je umístěna krychlička se skleněným hranolem a Ronchi mřížka.

Kolečko na filtry je neosazené a v sestavě se nachází kvůli odhadu velikosti celého zařízení a délek optických drah. Filtr byl provizorně umístěn do palcové osmicentimetrové závitové trubky, která byla přišroubována ke krychličce s pravoúhlým skleněným hranolem. Po sestavení na základovou konstrukční desku jsme získali představu o velikosti modelu včetně délek optických drah.

Testované zrcadlo mělo střed křivosti 75 cm a průměr 10 cm s otvorem uprostřed. Celkový pohled na sestavu je zachycen na fotografii 3.3. Vzdálenost středu křivosti byla naměřena svinovacím metrem a jemné nastavení se řešilo posouváním desky při pozorování.



Obrázek 3.3: Celkový pohled na sestavu

Použité součástky

Jelikož při stavbě prvního modelu, nebyly k dispozici všechny součástky z původního návrhu, jak bylo uvedeno výše. Místo skleněné homogenizační trubičky byl k homogenizaci světla použitý list papíru, což se ve výsledku ukázalo jako postačující. V tabulce 3.1 je seznam použitých součástek včetně celkové ceny. Celková cena 849 EUR je vysoká, ale do ceny jsou započítány i konstrukční prvky, které jsou standardně součástí laboratoře a značně celkovou cenu prototypu zvyšují.

Výsledky pozorování

První pozorování prozradilo, že princip je funkční. Z hlediska měření neměly obdržené ronchigramy žádnou vypovídající hodnotu. Hlavní cíl byl splněn ověřením funkčnosti testu. Nejzásadnějším poznatkem byla možnost použití běžně dostupné stolní LED lampičky místo několikanásobně dražší LED diody.

K homogenizaci světla byl použitý list papíru. V praxi se ukázalo, že by se mohl použít místo skleněného difuzoru.

Zkoušeli jsme 2 varianty umístění papíru. Při umístění ihned za lampičku byl pozorovatelný kontrastní ronchigram. Z hlediska konstrukce by ale bylo výhodné umístit papír do krychličky se skleněným hranolem, protože by odpadl problém s uchycením, papír by byl schovaný v krychličce a zároveň by byl dobře přístupný pro odstranění, či výměnu. Při testování se ukázalo, že se zvětšující se vzdáleností papíru od zdroje světla se zhoršuje kontrast ronchigramu. Když byl papír umístěn do krychličky těsně před skleněný hranol (vzdálenost od zdroje 9 cm), kontrast byl tak malý, že by tato sestava nebyla vzhledem k úhlové vyzařovací charakteristice lampičky použitelná.

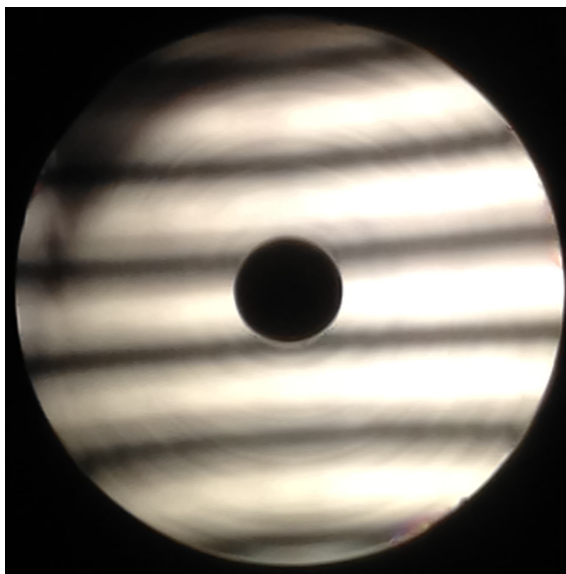
Při odstranění trubky s filtrem a posunutí filtrového kolečka se zdrojem co nejblíže hranolu se kontrast sice zlepšil. Přestože se optická dráha zkrátila na 3 cm, kontrast byl stále o dost menší, než v případě umístění papíru bezpro-

Součástka	Počet kusů	Cena	
Aluminium Breadboard	1x	239,25€	
Mounting Base	2x	9,74€	
Post Holder	2x	12,24€	
Post	2x	8,24€	
Cage Cube	1x	110,93€	
Cage Cube Adapter	1x	33,50€	
Hranol	1x	36,11€	
Závitová trubka	1x	22,40€	
Filtr	1x	117,44€	
Filter Wheel	1x	248,47€	
Lampička	1x	10€	
Cena celkem: 848,32€			

Tabulka 3.1: Součástky pro stavbu prvního modelu. Obrázky převzaty z <http://www.thorlabs.de>

středně za zdroj světla.

Počítalo se s pozorováním lidským okem, takže fotoaparát nebylo možné za mřížku umístit tak, aby kvalitně zachytil pozorovaný ronchigram. To se na snímku 3.4 podepsalo tmavým místem v horní části zrcadla.



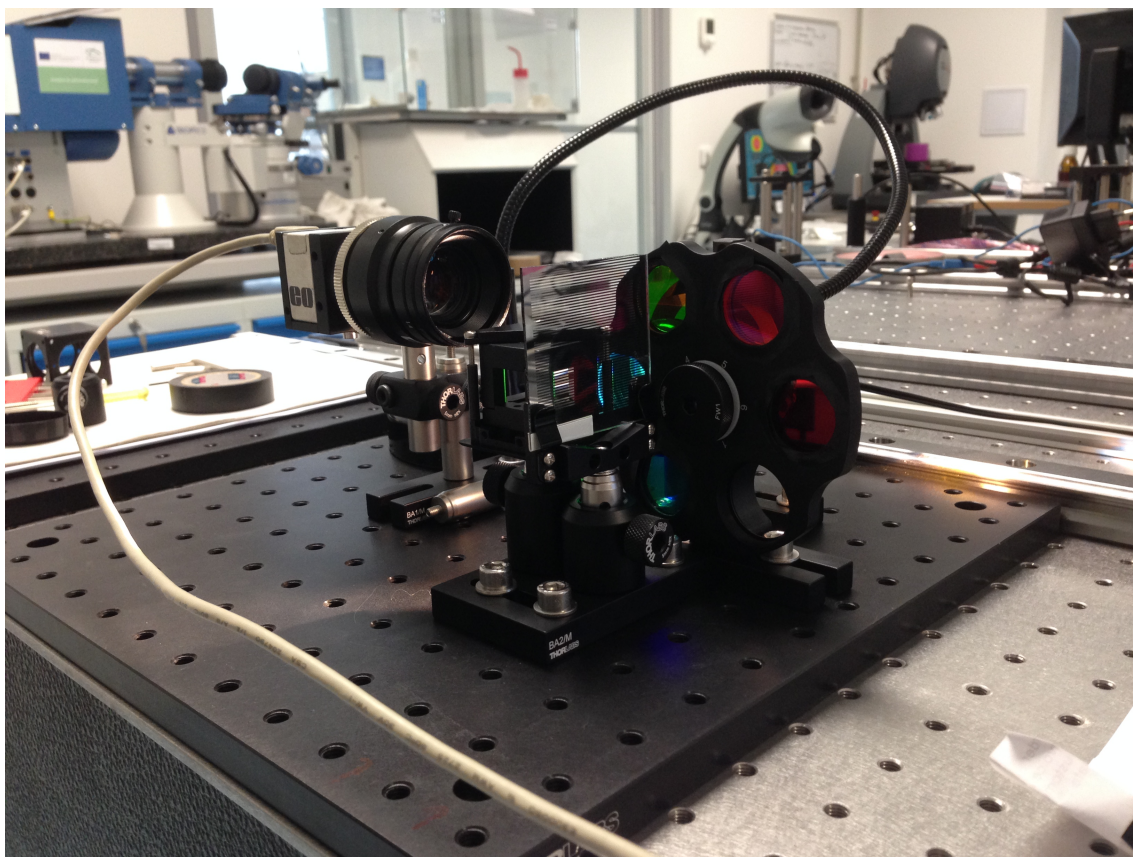
Obrázek 3.4: Ronchigram v bílém světle z prvního prototypu

3.3 Druhý prototyp

Nejvýraznější změnou oproti prvnímu prototypu bylo použití kamery pro zobrazení ronchigramu na obrazovce počítače. Tato skutečnost umožňuje kvalitně zachytit výstup testu pro pohodlnější vyhodnocení. Další změny celé zařízení zmenšily a zkrátily optické dráhy. Výsledná cena tohoto prototypu je velmi vysoká, cenu nejvíce navýšila cena použitých filtrů a konstrukční prvky, které jsou standardně součástí laboratoře. Obrázek 3.5 zachycuje detail sestavy.

Použité součástky

Zásadní konstrukční změnou oproti prvnímu modelu a původnímu návrhu je absence závitové trubky, která měla sloužit k upevnění a krytí homogenizační



Obrázek 3.5: Detail sestavy druhého prototypu

trubičky a kondenzoru. Homogenizační trubičku nahradil obyčejný bílý list kancelářského papíru a funkce kondenzoru byla nahrazena čočkou na použité LED lampičce.

První prototyp prokázal funkčnost tohoto řešení, proto jsme se rozhodli v dalším modelu využít jako zdroj světla výše zmíněnou stolní LED lampičku. Původní návrh počítal s LED diodou 16x dražší. Lampička zastoupila i funkci kondenzoru, zde je sice uspořádaná částka vzhledem k celkové ceně zanedbatelná, ale tato skutečnost zkracuje optickou dráhu od LED diody ke skleněnému hranolu a ulehčuje konstrukční práci. Tato vzdálenost byla výrazně zkrácena absencí osmicentimetrové závitové trubky. Optická dráha byla tedy v rámci laboratorních podmínek zkrácena na minimum. Z původních 12 cm je nyní délka optické dráhy od LED diody k hranolu 4 cm.

Součástka	Počet kusů	Cena	
Aluminium Breadboard	1x	239,25€	
Mounting Base	2x	9,74€	
Post Holder	2x	12,24€	
Post	2x	8,24€	
Cage Cube	1x	110,93€	
Cage Cube Adapter	1x	33,50€	
Hranol	1x	36,11€	
Filter Wheel	1x	248,47€	
Filtr	6x	651€	
Lampička	1x	10€	
Cena celkem: 1359,48€			

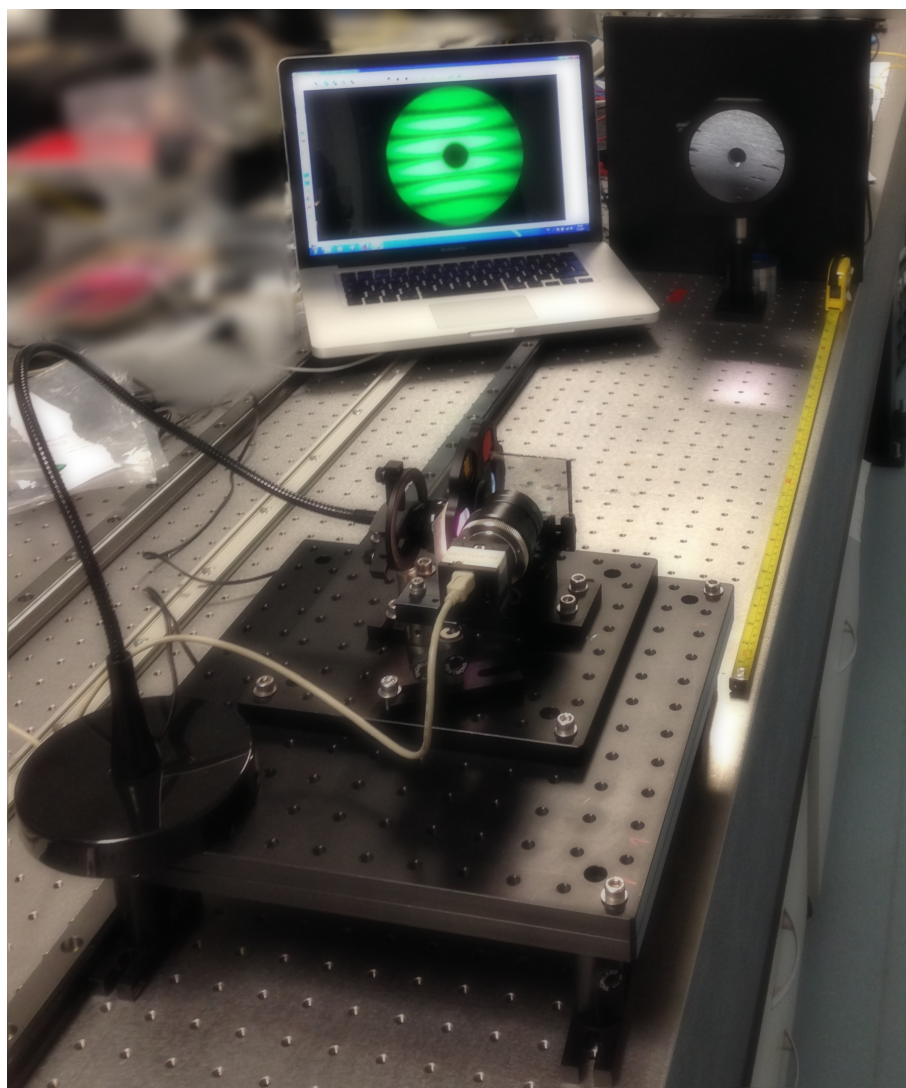
Tabulka 3.2: Součástky pro stavbu druhého modelu. Obrázky převzaty z <http://www.thorlabs.de>

Další změnou bylo osazení filtrového kola šesticí filtrů. V první verzi bylo kolo v sestavě pouze pro zjištění celkových rozměrů. Při osazování kolečka se vyskytl problém s velikostí slotů pro filtry. Filtrové kolo je dimenzováno na

určitou hloubku filtrů, je-li tato hloubka dodržena, filtry lze do kolečka snadno našroubovat. Naše filtry tento rozměr o 0,5 mm přesáhly a musely proto být ke kolečku přilepeny. Výčet všech použitých součástí je shrnutý v tabulce 3.2.

Výsledky pozorování

Testování proběhlo na stejném vzorku jako u prvního prototypu. Zrcadlo s průměrem 10 cm a středem křivosti 75 cm zachycuje obrázek 3.6, kde je vyfotografován celý testovací systém.



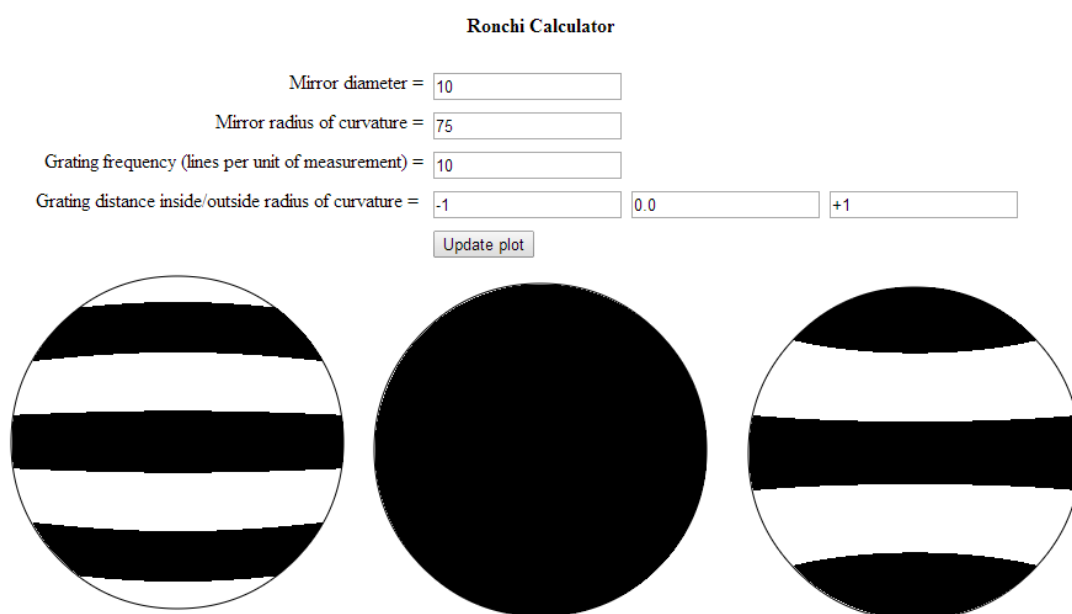
Obrázek 3.6: Pohled na testovací sestavu

Simulace ronchigramů byly získány pomocí softwaru Ronchi calculator⁴. Vstupními parametry jsou průměr zrcadla, střed křivosti a frekvence proužků na mřížce. Výchozí jednotkou pro vstupní parametry byl zvolen 1 cm.

Použití mřížky s hustotou 1 proužek/mm

Testování ve vzdálenosti ± 1 cm od středu křivosti

Na obrázku 3.7 se nachází layout použitého softwaru s nasimulovanými ronchigramy. Ronchigram vlevo odpovídá pozorovatelnému obrazci v případě, že je mřížka umístěna 1 cm před středem křivosti. Prostřední ronchigram odpovídá umístění mřížky do středu křivosti a pravý ronchigram odpovídá umístění mřížky 1 cm za středem křivosti.

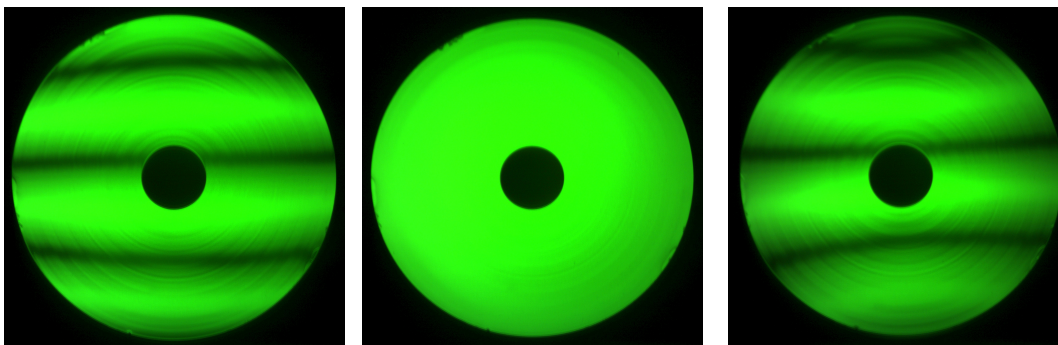


Obrázek 3.7: Layout programu Ronchi Calculator. Vlevo ronchigram 1 cm před středem křivosti, uprostřed ronchigram ve středu křivosti, vpravo ronchigram 1 cm za středem křivosti.

Ze simulace je patrné, že ve středu křivosti je zrcadlo zastíněné - proužky

⁴Dostupné online <http://www.bbastrodesigns.com/ronchi.html>

jsou širší než je průměr testovaného zrcadla. U krajních ronchigramů bychom při testování měli pozorovat ronchigramy se stejným zakřivením proužků.



(a) Před středem křivosti

(b) Střed křivosti

(c) Za středem křivosti

Obrázek 3.8: Ronchigramy obdržené testováním při použití mřížky s hustotou 1 proužek/mm. Vzdálenosti od středu křivosti jsou ± 1 cm.

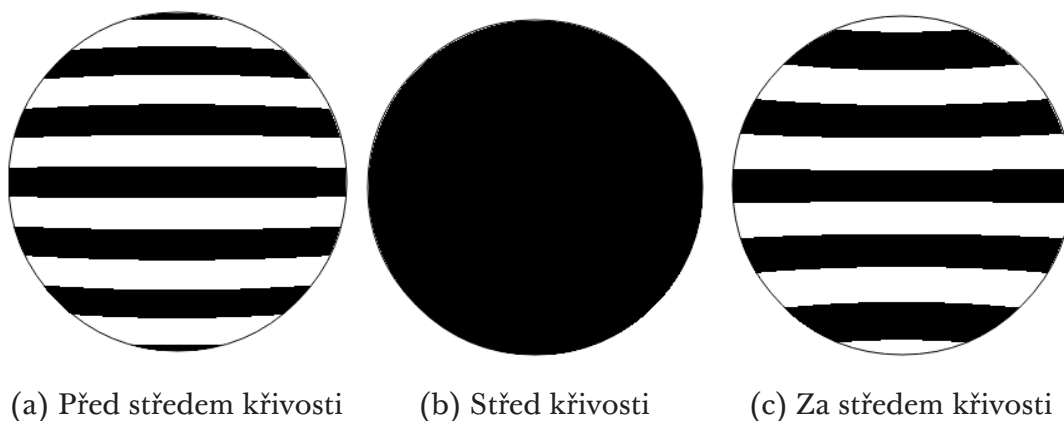
Obrázek 3.8 obsahuje ronchigramy obdržené testováním. Oproti nasimulovaným ronchigramům se mírně liší v několika bodech.

- Tmavé proužky mají uprostřed vyšší intenzitu než na krajích a simulované ronchigramy mají po celé šířce stejnou intenzitu. Tento rozdíl je způsobený tím, že simulované proužky jsou binární a testované jsou analogové (harmonické).
- Proužky obdržené testováním nejsou vycentrované a střed křivosti je místo zastínění kompletně nasvícen. Tato skutečnost je dána seřazením testovacího přístroje (proužky jsou posunuty na jednu stranu od středu křivosti - simulace tuto možnost neuvažuje) a na vyhodnocení obrazců nemá vliv.

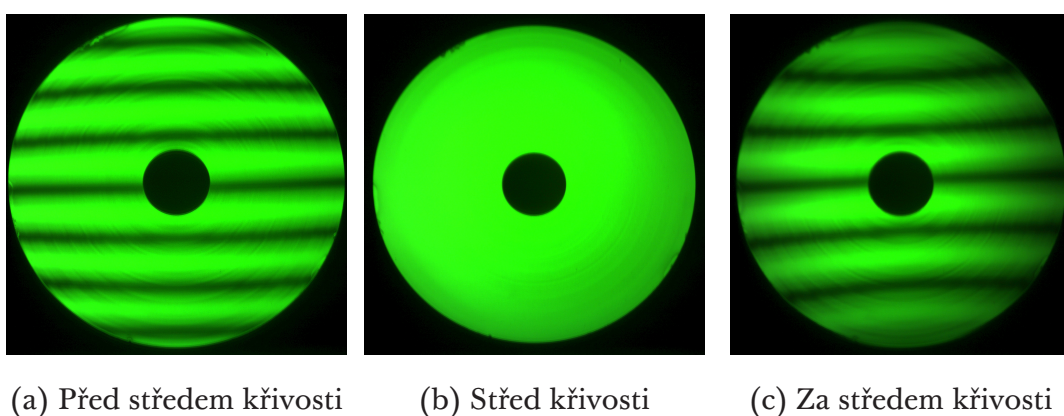
Testování ve vzdálenosti ± 2 cm od středu křivosti

Z principu Ronchi testu je jasné, že oba ronchigramy budou mít s větší vzdáleností od středu křivosti větší počet proužků. Teto fakt potvrzují nasimulované ronchigramy na obrázku 3.9.

Testováním jsme dosáhli velmi podobných výsledků, na tmavých prouzcích je opět vidět rozdílná intenzita uprostřed a na krajích proužků. Šířka i sklon proužků se shoduje s výsledky ze simulace, až na efekty zmíněné výše.



Obrázek 3.9: Nasimulované ronchigramy pro mřížku o hustotě 1 proužek/mm. Vzdálenosti od středu křivosti jsou ± 2 cm.



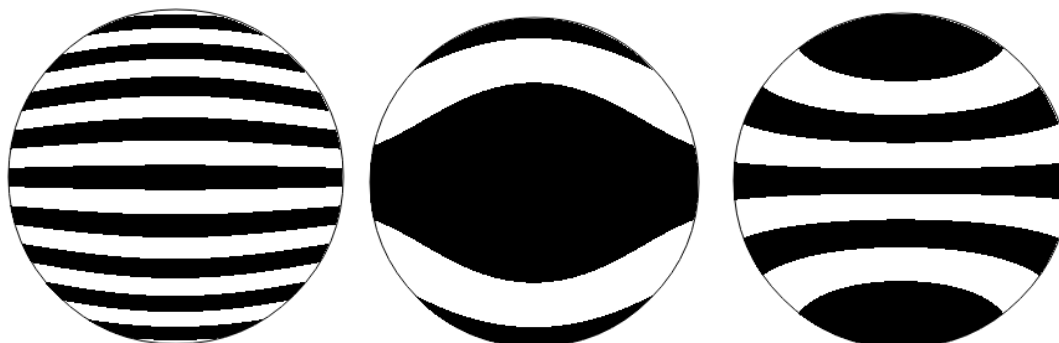
Obrázek 3.10: Ronchigramy obdržené testováním při použití mřížky s hustotou 1 proužek/mm. Vzdálenosti od středu křivosti jsou ± 2 cm.

Použití mřížky s hustotou 5 proužků/mm

Testování ve vzdálenosti $\pm 0,5$ cm od středu křivosti

Stejný test byl proveden i s mřížkou o hustotě 5 proužků/mm. V tomto případě jsme zvolili jiné vzdálenosti od středu křivosti, než v předchozím případě.

Mřížka s vyšší hustotou proužků na mm způsobuje na krátké vzdálenosti velké změny na tloušťce proužků. Simulované ronchigramy byly opět vytvořeny pomocí softwaru Ronchi Calculator, jejich podobu zachycuje obrázek 3.11.

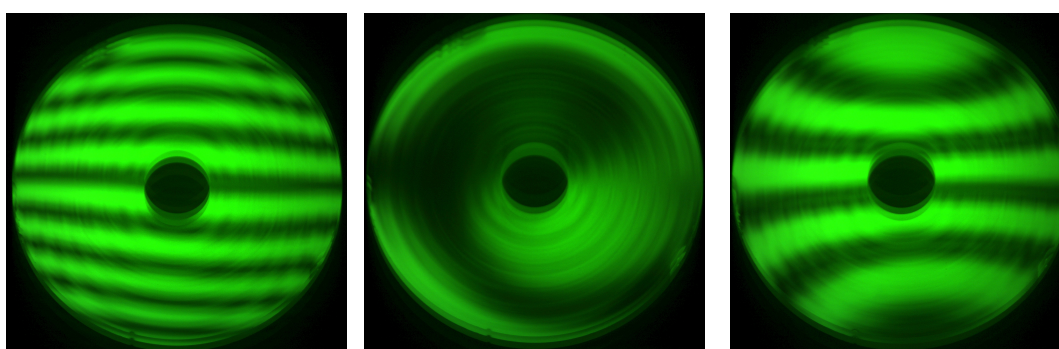


(a) Před středem křivosti

(b) Střed křivosti

(c) Za středem křivosti

Obrázek 3.11: Nasimulované ronchigramy pro mřížku o hustotě 5 proužků/mm. Vzdálenosti od středu křivosti jsou $\pm 0,5$ cm.



(a) Před středem křivosti

(b) Střed křivosti

(c) Za středem křivosti

Obrázek 3.12: Ronchigramy obdržené testováním při použití mřížky s hustotou 5 proužků/mm. Obrázky 3.12a a 3.12c odpovídají umístění mřížky 0,5 cm před a za středem křivosti.

Oproti simulaci pro mřížku s hustotou 1 proužek/mm obsahují tyto ronchigramy více proužků a jsou více zakřivené. Střed křivosti není zastíněný, ale obsahuje dva světlé proužky. Dle obrázku 3.12c lze zjistit, že testované zrcadlo není dokonale sférické, ale parabolické (viz. tabulka 2.1).

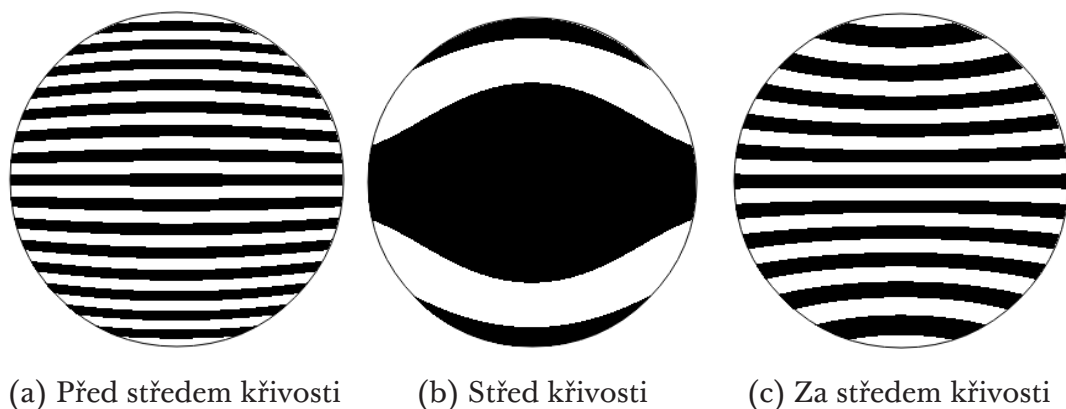
Při použití mřížky s vyšší frekvencí proužků jsme obdrželi několik obrazců,

které se nedokonale překrývaly. Tato skutečnost způsobila neshodu simulovaného a testem obdrženého ronchigramu ve středu křivosti zrcadla. Nedokonalé překrytí způsobilo mírné rozmazání obdržených obrazců, nicméně měření před středem a za středem křivosti zrcadla podala uspokojivé výsledky.

Na ronchigramech (obrázek 3.12) jsou jasně na povrchu jasně vidět krouživé vady způsobené obráběcím CNC strojem. Ronchigramy obdržené před středem a za středem křivosti jsou velmi podobné těm nasimulovaným, opět s nesrovnalostmi uvedenými výše.

Testování ve vzdálenosti ± 1 cm od středu křivosti

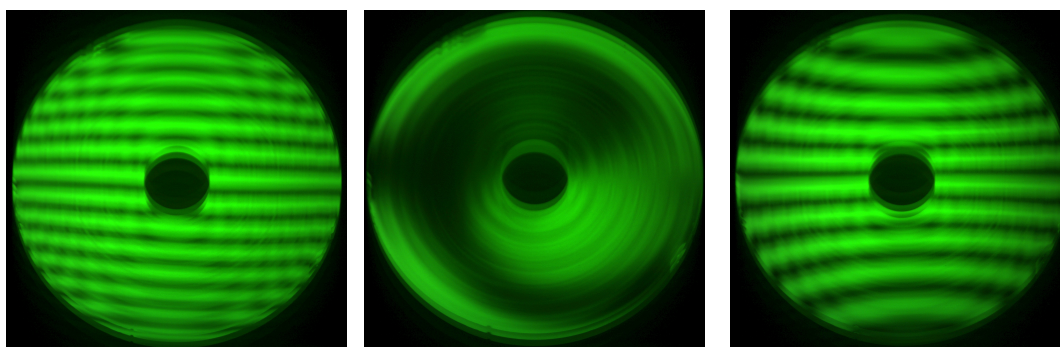
S větší vzdáleností od středu křivosti zrcadla se proužky zúžili a bylo jich pozorovatelných více, než ve vzdálenosti 0,5 cm. Opět jsme dosáhli velmi podobných výsledků jako při simulaci a proužky mají stejný sklon i tloušťku. Na základě těchto měření jsme povrch testovaného zrcadla vyhodnotily jako parabolický s krouživými vadami způsobenými obráběcím CNC strojem.



Obrázek 3.13: Ronchigramy získané měřením na druhém prototypu.

3.4 Návrh konstrukce pro použití ve výrobě

Veškeré testování bylo provedeno v laboratorních podmínkách, pro použití testu ve výrobě je vhodné, aby konstrukce testu byla co nejjednodušší a dostatečně robustní pro časté používání. V laboratorních prototypyech jsme zjistili,



(a) Před středem křivosti (b) Střed křivosti (c) Za středem křivosti

Obrázek 3.14: Ronchigramy získané měřením na druhém prototypu.

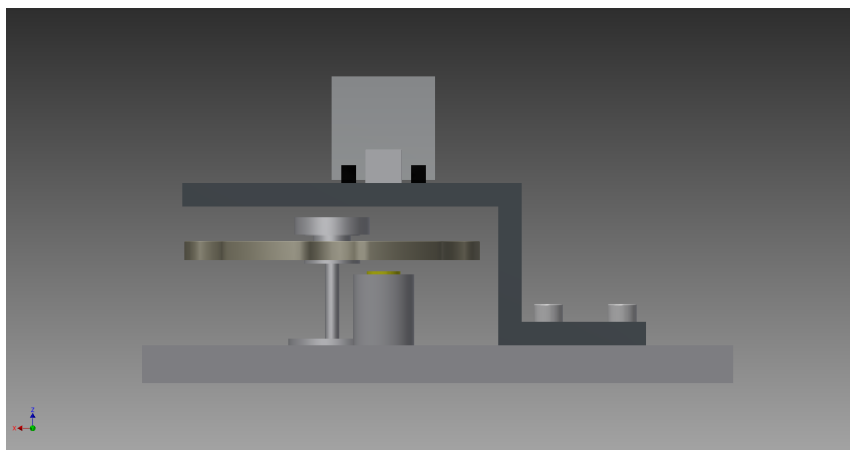
že pro získání nejlepších výsledků je vhodné, aby zdroj světla a bod pozorování byly co nejbližší optické ose zrcadla a aby v prostoru pro pozorování ronchigramů byl dostatek místa pro pohodlné vyhodnocování lidským okem, nebo umístění kamery.

Na obrázku 3.15 je zobrazen návrh možného řešení s využitím konstrukce ve tvaru ”písmene Z”, kde horní část konstrukce zakývá karuselové kolo s osazenými filtry. Pro dosažení optimálních výsledků je vhodné, aby optická dráha od zdroje světla k pravoúhlému hranolu byla co nejkratší. Tato vzdálenost závisí především na velikosti a tvaru LED žárovky.

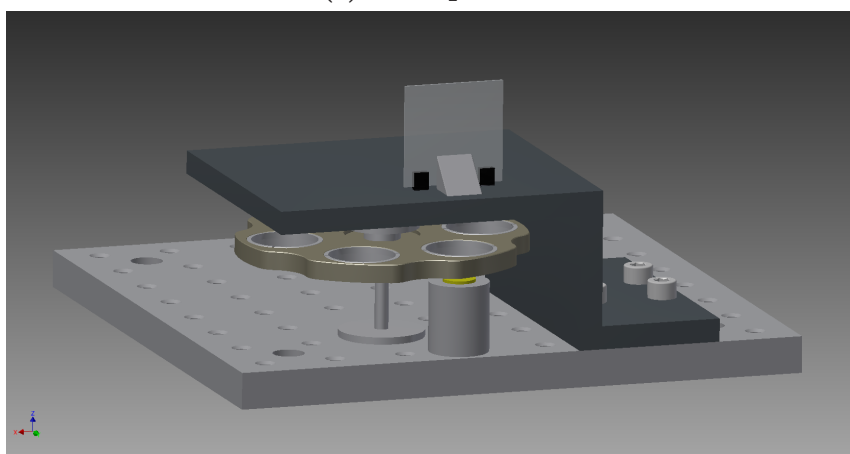
3.5 Shrnutí

Kapitola popisuje průběh konstrukce Ronchi testu od výběru součástek až po samotná měření na sestavených prototypy. Původní výběr součástek vycházel z principiálního schématu Ronchi testu. Součástky byly vybírány s ohledem na požadavek možnosti měření jak v bílém, tak v monochromatickém světle. Tento problém byl vyřešen výběrem šesticí filtrů, které byly umístěny do otočného karuselového kola, což umožňuje pohodlnou změnu filtru přímo při samotném měření.

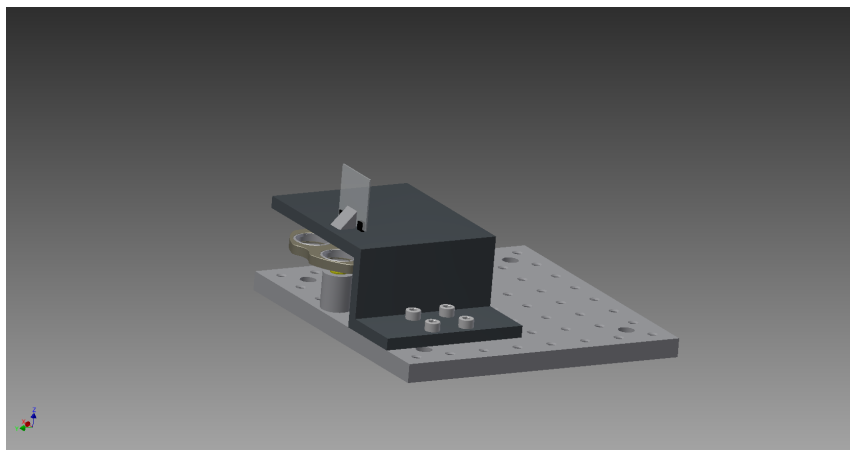
Před závěrečným testováním vznikly dva prototypy a u obou sestav jsme se potýkali s několika problémy. V době stavby prvního prototypu jsme ne-



(a) Čelní pohled



(b) Detail



(c) Boční pohled

Obrázek 3.15: Návrh možného vzhledu

měli k dispozici všechny součástky. Z tohoto důvodu byla jako zdroj světla použita běžně dostupná LED lampička místo původně zamýšlené LED diody z obchodu ThorLabs. Další součástkou, která nebyla k dispozici byla skleněná homogenizační trubička, kterou nahradil bílý list kancelářského papíru. První sestava sloužila především k analýze rozměrů a seznámení se s problematikou.

Provizorní řešení s LED lampičkou a listem papíru se ukázalo jako postačující, proto byl původní návrh součástek změněn a zůstali jsme u tohoto řešení.

Zásadní změnou u druhého prototypu bylo použití kamery k vyhodnocení ronchigramů, což umožnilo kvalitní záznam naměřených výsledků.

Testovali jsme zrcadlo s průměrem 10 cm a středem křivosti 75 cm. Měřili jsme se dvěma typy Ronchi mřížek o hustotě 1 resp. 5 proužků/mm. Zjistili jsme, že zrcadlo nebylo dokonale sférické, ale parabolické. Na obdržených ronchigramech jsou viditelné stopy po obrábění CNC strojem, tyto výsledky jsou detailněji popsány výše v kapitole.

Po zkušenostech ze stavby prototypů a provedených měření jsme se pokusili navrhnout finální konstrukci, která bude dostatečně robustní pro využití při výrobě optických elementů.

Závěr

Cílem práce bylo vypracovat rešerši s ohledem na základní principy optického měření s důrazem na Ronchi test a tento test pak navrhnout a sestavit.

Práce se je rozčleněna na tři hlavní části, kde první část obsahuje souhrn základních informací o světle a interferenci světelných vln. V kapitole jsou popsány typy elektromagnetických vln, jejich vlnové délky a vlnové délky viditelného světla. Dále je vysvětleno, že interferenční jev vzniká při superpozici dvou světelných vln a ve výsledku se určité části vln zesílí a jiné vyruší. Díky tomu vznikne interferenční obrazec, který lze vytvořit pomocí interferometrů a interferometrických testů. Těmto zařízením se věnuje druhá část první kapitoly, kde jsou z nadhledu popsány principy těchto zařízení.

Druhá kapitola je zaměřena na teorii Ronchi testu. Nejprve je detailně vysvětlen princip Foucaultova testu, jelikož Ronchi test je jeho přímou modifikací. Princip Foucaultova testu je popsán pro dva případy a to pro testování dokonale sférického optického členu a sférického členu s vadou. Obdobným způsobem je pak popsán i princip Ronchi testu, tomu je však věnováno více prostoru a druhá část kapitoly shrnuje základní teoretické informace o této metodě měření.

Závěrečná část je věnována konstrukci Ronchi testu a realizaci typového měření. Úvod kapitoly se zabývá výběrem součástek na základě principiálního schématu testu. Postupně vznikly dva prototypy Ronchi testu, kde první sloužil především pro ověření funkčnosti a analýzu délek optických drah. Při jeho stavbě, nebyly k dispozici všechny součástky, proto byla původně plánovaná LED dioda nahrazena běžně dostupnou stolní LED lampičkou a skleněnou

homogenizační trubičku nahradil list bílého kancelářského papíru. Toto improvizované řešení se ukázalo jako dostačující řešení, proto byl původní návrh součástek změněn a počítalo se s využitím zmíněné lampičky a listu papíru.

Zásadní změnou ve druhém prototypu bylo využití kamery pro snadné zachytávání obdržených ronchigramů. Dále byly zkráceny optické dráhy a karuselové filtrové kolo bylo osazeno všemi filtry. Na této sestavě bylo provedeno závěrečné testování kulatého zrcadla s průměrem 10 cm a středem křivosti 75 cm.

Pomocí softwaru Ronchi Calculator byly vygenerovány referenční ronchigramy, se kterými pak byly porovnávány ronchigramy obdržené testováním.

K testování byly použity dva typy mřížek - mřížka s hustotou 1 čára/mm a mřížka s hustotou 5 čar/mm. Obdržené ronchigramy byly velmi podobné těm simulovaným a na základě tvaru obdržených proužků bylo testované zrcadlo vyhodnoceno jako parabolické.

V závěru práce je návrh možného vzhledu zařízení pro použití ve výrobě. Návrh vychází ze zkušeností získaných při stavbě laboratorních prototypů a při návrhu byl kladen důraz na co nejmenší délku optické dráhy a pevnost konstrukce.

Tímto byla vyřešena základní část konstrukce, práce dále může směřovat k návrhu a realizaci posuvu, pro snadnou kalibraci testování a zjišťování středu křivosti testovaného objektu. Dále je možné test rozšířit softwarem pro automatické vyhodnocování ronchigramů a jejich porovnávání s teoretickou předpovědí.

Literatura

- [1] HARIHARAN, Parameswaran. *Basics of interferometry Second edition*. London: Academic Press, 2007. ISBN 978-0-12-373589-8
- [2] MALACARA, Daniel. *Optical Shop Testing Third edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-471-48404-2
- [3] Saleh, Bahaa E.A. *Fundamentals of Photonics*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-471-35832-9
- [4] HARIHARAN, Parameswaran. *Optical interferometry*. London: Academic Press, 2003. ISBN 0-12-311630-9
- [5] MALACARA, Daniel; SERVÍN, Manuel; MALACARA, Zacarias. *Interferogram Analysis for Optical Testing Second Edition*. Boca Raton: CRC Press, 2005. ISBN 978-1-57444-682-1
- [6] HARBOUR, David Anthony. *Understanding Foucault: A primer for Beginners* [cit. 2014-10-5] Dostupné z: <http://www.atm-workshop.com/foucault.html>
- [7] PAVELEK, Milan; JANOTKOVÁ, Eva; Štetina, Josef. *Vizualizační a optické měřicí metody [elektronická skripta]*. [cit. 2014-10-5] Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>
- [8] ANDERSON, J. A.; PORTER, Russell W. *Ronchi's Method of Optical Testing. The Astrophysical Journal. 1929, vol. 70, s. 175-. DOI: 10.1086/143213*. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/doi/10.1086/143213>

- [9] *Kurs broušení astronomických zrcadel. Říše hvězd: časopis pro pěstování astronomie a příbuzných věd.* V Praze: Česká společnost astronomická v Praze, roč. 1977.
- [10] *Build a Mirror Tester A Foucault or Knife Edge Tester and Ronchi Tester.* [online]. [cit. 2014-05-15] Dostupné z: <http://stellafane.org/tm/atm/test/tester-1.html>
- [11] MANSURIPUR, Masud. *The Ronchi Test. Optics & Photonics News.* July 1997. Dostupné z: <http://www.mmresearch.com/articles/article1/index.htm>
- [12] *Reading Ronchigrams.* [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://stellafane.org/tm/atm/test/ronchigrams.html>
- [13] STEEL, W. H. *Interferometry.* Cambridge: Cambridge University Press, 1983. ISBN: 978-0521311625
- [14] BORN, M; WOLF, E. *Principles of Optics.* Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN: 978-0521642224
- [15] SALEH, B. E. A; TEICH, M. C. *Žáklady fotoniky 1.* Praha : MATFY-ZPRESS, 1994. ISBN: 80-85863-01-4
- [16] SALEH, B. E. A; TEICH, M. C. *Žáklady fotoniky 2.* Praha : MATFY-ZPRESS, 1994. ISBN: 80-85863-02-2
- [17] RONCHI, V. *Le frange di combinazioni nello studio delle superficie e dei sistemi ottici [Combination fringes in the study of surfaces and optical systems].* Rivista d'Ottica e Meccanica di precisione [Journal of Optics and Precision Mechanics], vol. 2, pages 9-35, 1923.
- [18] MANSURIPUR Masud (July 1997) *The Ronchi test.* Optics & Photonics News, vol. 8, pages 42-46. Dostupné z: <http://www.mmresearch.com/articles/article1/index.htm>.

- [19] FOUCAULT L. *Description des procedees employes pour reconnaitre la configuration des surfaces optiques*. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Academie des Sciences, Paris, vol. 47, pages 958-959 (1858).
- [20] ERDÖS, Paul. *Ronchi Test of Fifth-Order Aberrations*. J. Opt. Soc. Am. 49, 865-865, 1959. Dostupné z: <http://ebooks.cambridge.org/chapter.jsf?bid=CB09780511803796&cid=CB09780511803796A051>

Obsah přiloženého CD

- text_bakalarske_prace
 - bakalarska_prace_2014_Robin_Dvorak.pdf
 - kopie_zadani_bakalarska_prace_2014_Robin_Dvorak.pdf
- vykresova_dokumentace - zdrojové soubory 3D návrhu modelu v programu Autodesk Inventor
 - soucastky
 - model.iam
 - model.ipj